А. В. ПЕРЫШКИН

КУРС ФИЗИКИ

ЧАСТЬ 3

А. В. ПЁРЫШКИН

КУРС ФИЗИКИ

УЧЕБНИК ДЛЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, ОПТИКА И СТРОЕНИЕ АТОМА

Утверждён
Министерством просвещения РСФСР

ИЗДАНИЕ ДВЕНАДЦАТОЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»
Москва — 1965

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

1. Значение учения об электрических явлениях для современной науки и техники 3

Глава I. Электрические заряды и электрическое поле.

2. Электризация тел. Электрический заряд 5
3. Электрическое поле 6
4. Закон Кулона 7
5. Единицы электрического заряда 9
6. Распределение заряда по поверхности проводника 10
7. Электронная теория 12
8. Напряжённость электрического поля 13
9. Графическое изображение электрических полей 15
10. Однородное поле 17
11. Проводники в электрическом поле 19
12. Диэлектрики в электрическом поле 21
13. Диэлектрическая проницаемость 22
14. Работа в электрическом поле 23
15. Потенциал и разность потенциалов 24
16. Единицы потенциала и разности потенциалов 27
17. Связь разности потенциалов с напряжённостью поля 28
18. Условие равновесия зарядов в проводниках . . . . . —
19. Электрометр 29
20. Электроёмкость 31
21. Единицы электроёмкости 32
22. Конденсатор 33
23. Зависимость электроёмкости плоского конденсатора от его размеров и рода диэлектрика 35
24. Различные виды конденсаторов 38

Глава II. Постоянный электрический ток.

25. Условия возникновения и существования электрического тока . . 41
26. Постоянный ток. Направление тока. Действия тока 43
27. Мера тока. Единицы тока 44
28. Электрический ток в металлах 45
29. Скорость движения электронов внутри металла и работа выхода . . 47

30. Электрический ток в вакууме 48
31. Природа электрического тока в электролитах 49
32. Природа электрического тока в газах 51
33. Электродвижущая сила источника тока 53
34. Гальванический элемент 54
35. Поляризация элемента. Элемент Лекланше. 55
36. Аккумулятор 56
37. Закон Ома для участка цепи 59
38. Напряжение и падение напряжения 60
39. Единица сопротивления 61
40. Магазин сопротивлений . . . . . —
41. Зависимость сопротивления проводника от его размеров и материала 62
42. Зависимость сопротивления проводника от температуры 64
43. Последовательное соединение проводников 66
44. Параллельное соединение проводников 63
45. Расчёт цепи 71
46. Шунтирование измерительных приборов 74
47. Вольтметр 76
48. Добавочное сопротивление к вольтметру 77
49. Определение сопротивления проводников при помощи амперметра и вольтметра 79
50. Закон Ома для полной цепи 80
51. Электродвижущая сила и напряжение на зажимах источника тока 82
52. Короткое замыкание 84
53. Соединение элементов в батарею 85
54. Работа и мощность постоянного тока 87
55. Закон Джоуля — Ленца 89
56. Выбор сечения проводов для электрической проводки 91
57. Электрическая сварка металлов 93
58. Термоэлектрический ток 94
59. Электролиз. Первый закон Фарадея 97
60. Второй закон Фарадея 98
61. Число Фарадея 101
62. Заряд иона 102
63. Примеры применения электролиза в технике 103
64. Электрический ток в газе 107
65. Ионизация газа через столкновения 109
66. Различные виды разрядов в газах 110
67. Свеча Яблочкова 114
68. Применение электрической искры при обработке металлов 115
69. Прохождение тока через разрежённые газы 117
70. Катодные лучи 118
71. Природа катодных лучей 120

Глава III. Магнитное поле и электромагнитная индукция.

72. Магнитное поле 123
73. Направление магнитного поля 125
74. Магнитное поле прямолинейного тока . . . . . —

75. Магнитное поле кругового тока 127
76. Магнитное поле катушки с током 128
77. Действие магнитного поля на проводник с током 129
78. Индукция магнитного поля 130
79. Намагничивание железа 133
80. Магнитный поток 135
81. Электромагниты и их применение 136
82. Электромагнитное реле 137
83. Электроизмерительные приборы 138
84. Электромагнитный осциллограф 140
85. Микрофон и телефон 141
86. Громкоговоритель 143
87. Магнитное поле Земли 144
88. Явление электромагнитной индукции 146
89. Объяснение возникновения э. д. с. индукции на основе электронной теории 149
90. Направление индукционного тока. Закон Ленца 150
91. Величина электродвижущей силы индукции 152
92. Правило правой руки 154
93. Вихревые токи 155
94. Самоиндукция 156
95. Индуктивность катушки 158

Глава IV. **Переменный ток.**

96. Получение переменного тока 160
97. Генератор переменного тока 163
98. Величина переменного тока. Действующее (эффективное) значение тока и напряжения 165
99. Индуктивность и ёмкость цепи переменного тока 167
100. Трёхфазный ток 169
101. Соединение звездой 171
102. Соединение треугольником 173
103. Асинхронный двигатель . . . . . —
104. Двухэлектродная электронная лампа 176
104а. Устройство выпрямителей переменного тока 178
105. Генератор постоянного тока 181
106. Передача электрической энергии 182
107. Трансформатор 184
108. Электрификация СССР 188

Глава V. **Электромагнитные колебания и волны.**

109. Изобретение радио А. С. Поповым 192
110. Колебательный контур. Электромагнитные колебания 193
111. Собственные электромагнитные колебания. Период и частота . . 196
112. Затухающие электромагнитные колебания 197
113. Трёхэлектродная электронная лампа 198
114. Получение незатухающих электромагнитных колебаний 199
115. Вынужденные колебания. Резонанс 200

116. Электромагнитное поле 203
117. Электромагнитные волны 204
118. Излучение и приём электромагнитных волн 206
119. Передатчик и приёмник А. С. Попова 207
120. Модулированные колебания 210
121. Детектирование. Детекторный приёмник 211
122. Простейший ламповый радиоприёмник 212
123. Электронная лампа в роли усилителя электромагнитных колебаний 213
124. Электронно-лучевая трубка 214
125. Радиолокация 216

РАЗДЕЛ II. ОПТИКА И СТРОЕНИЕ АТОМА.

Глава VI. Распространение света.

126. Введение. Источники света 219
127. Закон прямолинейного распространения света 220
128. Скорость света 222
129. Световой поток. Точечный источник света 223
130. Сила света 224
131. Освещённость . . . . . —
132. Единицы светотехнических величин 225
133. Законы освещённости 226
134. Сравнение силы света двух источников 228

Глава VII. Отражение и преломление света.

135. Световой луч. Световой пучок 230
136. Явления, происходящие при падении света на тело 231
137. Законы отражения света . . . . . —
138. Диффузное и зеркальное отражения 232
139. Плоское зеркало 233
140. Вогнутое сферическое зеркало 234
141. Фокус вогнутого сферического зеркала . . . . . —
142. Построение изображений в вогнутом зеркале 236
143. Применение вогнутых зеркал 237
144. Выпуклое зеркало 238
145. Законы преломления света 239
146. Полное отражение света 241
147. Изменение светового потока при отражении и преломлении . . . 243
148. Прохождение света через прозрачную пластинку с параллельными гранями . . . . . —
149. Прохождение света через прозрачную треугольную призму . . . 244
150. Линзы 246
151. Фокус линзы 248
152. Оптическая сила линзы 249
153. Изображение точки в собирающей линзе 250
154. Изображение предметов в собирающей линзе 251
155. Формула линзы 253
156. Двояковогнутая линза 254

Глава VIII. Оптические приборы. Зрение.

157. Фотографический аппарат 257
158. Проекционные аппараты 258
159. Глаз 259
160. Зрение 260
161. Дефекты зрения. Очки 262
162. Зрение двумя глазами . . . . . —
163. Сохранение зрительных ощущений. Кино 263
164. Оптические приборы, вооружающие глаз 264
165. Лупа . . . . . —
166. Микроскоп 265
167. Телескоп-рефрактор 266
168. Зрительная труба. Бинокль 267

Глава IX. Волновые свойства света.

169. Интерференция волн 269
170. Интерференция света 271
171. Дифракция волн 273
172. Дифракция света 274
173. Дисперсия света. Опыты Ньютона 276
174. Длины волн и цветность лучей 278
175. Спектрограф и спектроскоп 279
176. Спектры испускания 280
177. Спектры поглощения . . . . . —
178. Спектральный анализ 281
179. Спектр Солнца 282
180. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи 283
181. Рентгеновские лучи 284
182. Электромагнитная природа света 287

Глава X. Действия света.

183. Фотоэффект 289
184. Понятие о квантах 291
185. Фотоэлементы 293
186. Фотореле 294
187. Запись и воспроизведение звука 295
188. Люминесценция 297
189. Электрические лампы холодного свечения 298
190. Химическое действие света 299
191. Давление света 301

Глава XI. Строение атома.

192. Явления, подтверждающие сложность строения атома 304
193. Виды радиоактивного излучения 305
194. Экспериментальные методы исследования частиц 306
195. Строение атома 309
196. Развитие теории атома. Излучение и поглощение электромагнитных волн атомами 311

197. Изотопы 313
198. Массовое число. Обозначение ядер 314
199. Искусственное превращение элементов 315
200. Нейтрон 318
201. Строение атомных ядер. Внутриядерная энергия 319
202. Деление ядра урана. Цепная ядерная реакция 321
202а. Термоядерная реакция 324
203. Перспективы практического использования атомной энергии . . . 325
203а. Искусственная радиоактивность . . . . . —
203б. Применение радиоактивных элементов 327
204. Взаимная превращаемость частиц 329

Приложение 331

I. Дополнение к главе I «Электрические заряды и электрическое поле» —
II. Электрические свойства полупроводников 334
III. Дополнение к главе III «Магнитное поле и электромагнитная индукция» 345
IV. Дополнение к главе IV «Переменный ток» 359
V. Дополнение к главе V «Электромагнитные колебания и волны» . . 361
VI. Дополнение к главе XI «Строение атома» 363
VII. Физика и технический прогресс 372
Ответы 377

РАЗДЕЛ I
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1. Значение учения об электрических явлениях для современной науки и техники. В жизни современного общества электрическая энергия играет исключительно важную роль.

Электрическое освещение, электрические нагревательные приборы, телеграф, телефон, радио прочно вошли в быт советского человека. На фабриках и заводах, в шахтах и рудниках электродвигатели приводят в движение станки и разные механизмы. В металлургии в электрических печах получают высокие сорта стали и многие другие ценные металлы. Электрический ток широко используется в химической промышленности и на железнодорожном транспорте.

Исключительно важное значение имеет применение электрической энергии в сельском хозяйстве. Здесь электрическая энергия служит не только источником освещения, но её используют для приведения в действие различных машин, а также аппаратов, применяемых для механической дойки, стрижки овец, для подогревания воды, пастеризации молока и т. п.

Электрическая энергия может быть широко использована на птицеводческих фермах, в шелководстве, пчеловодстве, в борьбе с насекомыми и т. д.

Практическое использование электрической энергии привело к созданию ряда специальных отраслей техники: электротехники, электрохимии, радиотехники, телевидения, телемеханики и автоматики. На производстве электрические двигатели, обслуживающие отдельные станки и даже части станков, полностью заменили тепловые двигатели с их громоздкими трансмиссионными передачами.

В современной технике появились новые виды машин, в которых применяется одновременно большое количество электродвигателей. Возникли сложные станки-автоматы, освободившие рабочих во многих отраслях промышленности от тяжёлого физического труда.

Какие же особенности электрической энергии обусловливают столь широкую практическую применимость её?

Электрическую энергию легко преобразовать в другие виды энергии. И, что чрезвычайно важно, эти преобразования осуществляются с малыми потерями.

Электрическую энергию без больших потерь можно передавать по проводам на далёкие расстояния и распределять между потребителями. Это даёт возможность располагать заводы и фабрики возле источников сырья, а электрические станции — возле залежей топлива (угля, торфа, сланца) или на берегах рек.

Дробимость электрической энергии и высокий коэффициент полезного действия электрических машин и электроаппаратов обеспечивают чрезвычайно широкое применение её в самых разнообразных областях. В то время как мощность современных электрогенераторов достигает 200 тысяч киловатт, мощность электродвигателей может быть и очень малой. Так, например, существуют электродвигатели для часовых механизмов, мощность которых составляет всего 3 милливатта.

Велико научное значение учения об электрических явлениях. Оно позволило углубить наши знания о строении материи, найти общую причину многих явлений природы, ранее казавшихся не связанными друг с другом.

Всё это обусловливает особенную важность изучения основ электричества в средней школе. Всякий молодой человек, окончивший советскую среднюю школу, должен иметь основные понятия об электрических явлениях, об устройстве электростанций, о применении электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве, знать о плане электрификации страны.

Современное учение об электрических явлениях есть результат длительного и упорного труда многих поколений учёных разных стран и народов. Большой вклад в науку об электрических явлениях внесли и наши отечественные учёные: М. В. Ломоносов, В. В. Петров, Э. Х. Ленц, Б. С. Якоби, А. Г. Столетов, А. С. Попов, П. Н. Лебедев, Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси, С. И. Вавилов и другие.

ГЛАВА I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

2. Электризация тел. Электрический заряд. Электричество, электрический ток, электрическая энергия — эти слова знакомы сейчас каждому.

Но что такое электричество? Какова его природа? Ответить на эти вопросы нелегко. Для этого надо ознакомиться с весьма значительным кругом явлений, которые мы называем электрическими. Рассмотрим сначала происхождение термина «электричество».

За несколько веков до нашей эры учёные древней Греции установили тот факт, что после натирания янтарных предметов к ним притягиваются лёгкие тела. По-гречески янтарь — электрон; от этого слова и произошло название «электричество».

В конце XVI столетия английский учёный Гильберт открыл, что, кроме янтаря, свойство притягивать лёгкие тела приобретают при трении и многие другие вещества, например стекло, сера, смола. Явление возникновения таких свойств у тел было названо электризацией. Янтарь или любое другое вещество стали называть наэлектризованным, когда оно при трении приобретало свойство притягивать к себе лёгкие тела.

Электризацию тел объясняли появлением на теле электричества, или электрического заряда.

Чтобы наэлектризовать тело, необязательно натирать его другим телом; можно, например, прикоснуться к нему каким-нибудь предварительно наэлектризованным предметом. Прикоснувшись, например, стеклянной палочкой, потёртой о шёлк, к лёгкому пробковому шарику, подвешенному на шёлковой нити, мы наэлектризуем его.

Опыт показывает, что наэлектризованные тела притягивают или отталкивают друг друга.

Так, например, стеклянная палочка, наэлектризованная трением о шёлк, отталкивается от другой такой же наэлектризованной палочки (рис. 1) и притягивается к наэлектризованной при трении о мех эбонитовой палочке (рис. 2).

На основании подобных опытов пришли к заключению, что существует два рода электрических зарядов. Эти заряды про-

тивоположны друг другу в том смысле, что наэлектризованное тело притягивается одним из них и отталкивается другим.

Одни из этих зарядов условно назвали положительными, другие — отрицательными. За положительный заряд принимается заряд, появляющийся при электризации стеклянной палочки трением о шёлк.

Заряд же, появляющийся на смоляной палочке (или каучуковой) при трении её о мех, назвали отрицательным зарядом.

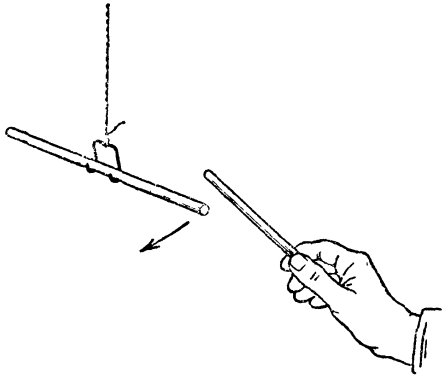


Рис. 1. Стеклянная наэлектризованная палочка отталкивается от другой наэлектризованной стеклянной палочки.

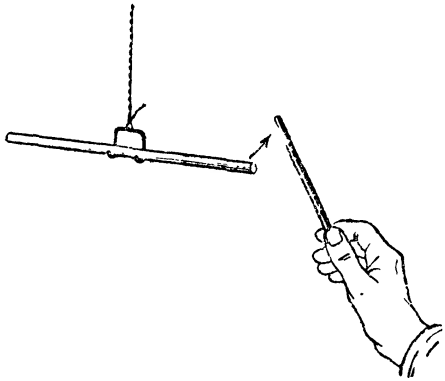


Рис. 2. Стеклянная наэлектризованная палочка притягивается наэлектризованной эбонитовой палочкой.

Наблюдения над взаимодействием наэлектризованных тел позволили установить, что *одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые притягиваются.*

На явлении взаимодействия наэлектризованных тел основано устройство электроскопов — приборов, служащих для обнаруживания электризации тел (рис. 3).

Рис. 3. Простейший электроскоп.

При прикосновении наэлектризованного тела к стержню электроскопа лёгкие листочки, подвешенные к стержню, отталкиваются друг от друга, так как заряжаются одноимёнными зарядами.

3. Электрическое поле. Вокруг каждого электрического заряда всегда существует электрическое поле. К представлению об электрическом поле привели многие опытные факты. Рассмотрим следующий опыт.

Подвесим на шёлковой нити лёгкий пробковый шарик и сообщим ему электрический заряд. Такого же знака заряд сообщим какому-нибудь телу A, установленному на подставке из изолятора (рис. 4).

С помощью пробкового шарика исследуем пространство, окружающее заряженное тело.

Помещая пробковый шарик в различные места этого пространства, мы всякий раз обнаруживаем наличие силы, действующей на шарик. Причём, чем ближе шарик к заряженному телу A,

тем сильнее он отталкивается от него, тем, следовательно, больше сила, действующая на него (рис. 4).

Этот опыт приводит нас к заключению, что в каждой точке пространства, окружающего заряженное тело A, на наш шарик действует сила. Если убрать заряженное тело A, то сила перестанет действовать на шарик.

Нам понятно такое взаимодействие двух тел, которое происходит или через непосредственное соприкосновение этих тел, или через посредство других тел, например через воздух, воду и т. д., передающих это действие. Но в описанных выше опытах взаимодействующие наэлектризованные тела не соприкасались друг с другом; опыт показывает, что взаимодействие наэлектризованных тел наблюдается и в безвоздушном пространстве.

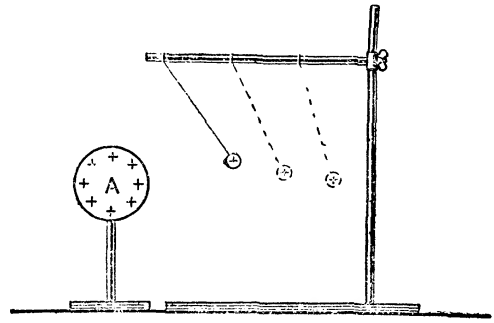


Рис. 4. Пробковый шарик отталкивается тем сильнее, чем ближе он к наэлектризованному телу.

Каким же образом происходит это взаимодействие наэлектризованных тел?

В результате длительных исследований учёные пришли к выводу, что *действие одного заряженного тела на другое осуществляется посредством электрических полей, окружающих эти тела.*

Наблюдаемое взаимодействие заряженных тел объясняется тем, что сила, действующая на одно из заряженных тел (в нашем опыте на пробковый шарик), обусловлена действием на него электрического поля, окружающего другое заряженное тело (в нашем опыте тело A).

Электрическое поле есть особая форма материи, неразрывно связанная со всяким электрическим зарядом.

Силы, с которыми электрическое поле действует на заряженные тела, называются электрическими силами.

Исследование электрического поля можно производить, вводя в поле небольшие заряженные тела. Такие тела мы будем называть «пробными зарядами». Например, пробным зарядом в описанном выше опыте был заряженный пробковый шарик. На него действовала сила со стороны поля заряженного тела A. Таким образом, наличие электрического поля может быть обнаружено по его действию на пробные заряды.

4. Закон Кулона. Сообщая незаряженному электроскопу электрический заряд того или другого знака, можно обнаружить, что листочки электроскопа расходятся на больший или меньший угол.

Прикоснёмся к стержню электроскопа наэлектризованной палочкой и заметим угол, на который разойдутся листочки. Для

того чтобы вызвать расхождение листочков на больший угол, нужно передать электроскопу заряд с большей поверхности заряженной палочки. Листочки, наоборот, сойдутся, если прикоснуться к стержню электроскопа рукой.

Таким образом, мы убеждаемся, что электрический заряд на телах может быть больше или меньше. Можно, следовательно, говорить о величине заряда, а стало быть, об измерении этой величины.

Измерение электрических зарядов стало возможным после открытия в конце XVIII в. французским физиком Кулоном закона взаимодействия между электрическими зарядами.

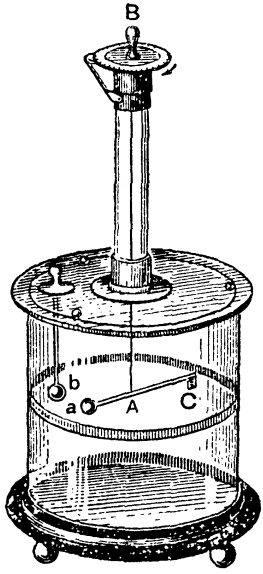


Рис. 5. Прибор, при помощи которого устанавливается закон взаимодействия наэлектризованных тел.

Кулон в своих опытах пользовался крутильными весами, при помощи которых он измерял силу взаимодействия между наэлектризованными телами.

Крутильные весы (рис. 5) состоят из лёгкого, не проводящего электрические заряды коромысла A, которое подвешено на очень тонкой металлической проволоке в цилиндрическом стеклянном сосуде. На одном конце стержня укреплён позолоченный пробковый шарик a, а на другом — противовес C. Проволока верхним своим концом прикреплена к центру головки B, которая снабжена указателем и может вращаться по шкале с делениями, служащей для определения угла закручивания закреплённой проволоки.

На крышке сосуда имеется отверстие, сквозь которое на изоляторе вводится другой такой же шарик b, равный шарику a по размеру. Угловое расстояние между шариками a и b отсчитывается по делениям на цилиндрическом сосуде; путём поворачивания головки B весов на некоторый угол это расстояние можно изменять.

Зарядив оба шарика и установив их на каком-нибудь расстоянии друг от друга, Кулон по углу закручивания нити, которое для этого требовалось произвести, определял силу взаимодействия между шариками [1].

Если прибор предварительно проградуирован, то по углу поворота головки можно определить силу взаимодействия между наэлектризованными шариками.

---

[1] Момент силы, возникающей при закручивании проволоки вследствие её упругости, равен моменту силы, приложенной к шарику. Эта сила является силой взаимодействия между шариками. Вращающий же момент этой силы при неизменном плече AC пропорционален силе.

Изменяя расстояние между шариками, Кулон установил, что при неизменных зарядах на них сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами шариков.

Вопрос о величине зарядов на шариках решён был следующим образом. Если зарядить шарик b, вынув его из прибора, и привести его в соприкосновение с другим, совершенно одинаковым, но незаряженным шариком, то половина заряда с шарика b перейдёт на этот другой шарик. На шарике b, таким образом, окажется вдвое меньший заряд. Вставив шарик b обратно в прибор, Кулон установил, что при неизменном расстоянии между шариками a и b сила взаимодействия убывала вдвое, т. е. прямо пропорционально уменьшению величины заряда шарика.

Аналогичным способом менялся заряд подвижного шарика a.

На основании этих опытов Кулон установил закон, согласно которому ***сила, с которой взаимодействуют два точечных заряда, прямо пропорциональна величинам зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль линии, соединяющей эти заряды.*** Закон этот выражается формулой:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где q_1 и q_2 — величины взаимодействующих точечных зарядов, r — расстояние между ними, k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения величин, входящих в формулу.

Точечными зарядами называются заряды, находящиеся на телах любой формы, размеры которых малы по сравнению с расстояниями, на которых рассматриваются их действия.

Исследования показали, что окружающая среда, в которой находятся заряды, влияет на величину силы F, и формула Кулона строго применима может быть только в случае взаимодействия заряженных тел в безвоздушном пространстве (вакууме).

5. Единицы электрического заряда. Закон Кулона даёт возможность установить единицу электрического заряда.

Пользуясь для измерения расстояния и силы единицами системы СГС и полагая $r=1$ *см*, $F=1$ *дин* и $q_1=q_2=q$, $k=1$, по формуле $F=\frac{q^2}{r^2}$ находим, что при этих условиях $q=\pm 1$ заряда.

За единицу электрического заряда принимают такой заряд, который действует в вакууме на равный ему заряд, находящийся на расстоянии одного сантиметра, с силой в одну дину.

Единицу заряда, установленную вышеуказанным способом, называют абсолютной электростатической единицей заряда (эл.-ст. ед. заряда).

Систему единиц для измерения электрических величин, в которой за единицу заряда принимается электростатическая единица заряда, называют абсолютной электростатической системой и обозначают СГСЭ.

В системе единиц СИ единицей заряда является 1 кулон (сокращённо 1 *к*). 1 кулон $= 3 \cdot 10^9$ эл.-ст. ед. заряда, или 1 $к = 3 \cdot 10^9$ ед. заряда СГСЭ.

Упражнение 1.

1. Каким образом Кулон, имея некоторый заряд на шарике, мог получить в 2, 3, 4 и т. д. раз меньшие заряды?

2. Написать наименование единицы электрического заряда в системе СГСЭ, т. е. выразить наименование единицы заряда через основные единицы системы *см, г, сек.*

3. Два маленьких шарика обладают равными зарядами и, находясь в вакууме на расстоянии 10 *см* друг от друга, отталкиваются с силой $F = 1$ *дин.* Определить величину зарядов.

4. Определить величину силы взаимодействия в пустоте двух маленьких шариков, заряженных одноимёнными зарядами по 20 эл.-ст. ед., если расстояние между шариками 10 *см.*

5. Два тела малых размеров с одноимёнными зарядами в $q_1 = 15$ и $q_2 = 45$ эл.-ст. ед. находятся на расстоянии 30 *см* друг от друга. На каком расстоянии от первого из них надо поместить третье тело с зарядом q_3, чтобы оно находилось в равновесии? Зависит ли это расстояние от заряда q_3?

6. Два маленьких шарика *а* и *с* имеют заряды, соответственно равные 1 и 4 эл.-ст. ед. В какой точке следует поместить заряженный шарик *b* между шариками *а* и *с*, чтобы он оказался в равновесии? Укажите, где имеется такая точка, в которой шарик *b* будет одинаково отталкиваться от двух других шариков в одном и том же направлении или притягиваться к ним.

7. Имеются два одноимённо заряженных шарика, массы которых соответственно равны 10 *г* и 1 *г*. Каков должен быть заряд первого шарика, чтобы сила тяготения между шариками уравновешивалась электрической силой, если заряд второго шарика равен 10^{-5} эл.-ст. ед.?

6. Распределение заряда по поверхности проводника. Установим полый металлический шар на изоляторе и зарядим его. Прикасаясь к различным частям поверхности шара маленьким металлическим шариком и передавая заряд шарика электроскопу, мы сможем судить о распределении заряда по поверхности большого шара.

Мы заметим, что при прикосновении шарика к наружной поверхности заряженного шара часть заряда шара переходит на шарик (рис. 6, *а*). При прикосновении же к внутренней поверхности шара маленький шарик совсем не получает заряда (рис. 6, *б*). Проделав аналогичные опыты с проводниками различной формы, мы получим один и тот же результат: *заряды на проводнике располагаются на его наружной поверхности.*

В зависимости от формы проводника распределение зарядов по его поверхности может быть весьма разнообразным.

Для характеристики распределения зарядов на поверхности проводника вводится величина, называемая поверхностной плотностью электрических зарядов. Она представляет собой отношение величины заряда q на поверхности проводника к площади поверхности S. Обозначая поверхностную плотность зарядов греческой буквой σ (сигма), можно написать:

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Плотность зарядов зависит от кривизны поверхности. У шара, кривизна поверхности которого во всех точках поверхности одинакова, электрические заряды распределены равномерно. Такое же равномерное распределение зарядов наблюдается и при электризации проводящей плоскости, в чём легко убедиться, например, на следующем опыте.

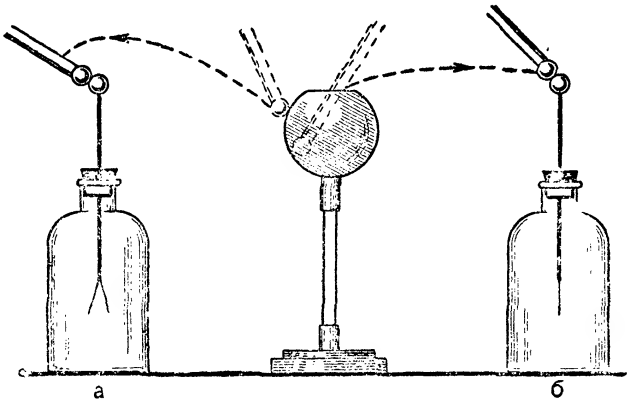


Рис. 6. Опыт, показывающий, что электрический заряд сосредоточивается на внешней поверхности проводника.

Прикрепим к поверхности металлической сетки *DE* ряд бумажных листочков (рис. 7) и сильно наэлектризуем сетку. Мы обнаружим, что все листочки отклоняются на один и тот же угол. Значит, электрические заряды по плоской поверхности распределяются с одинаковой плотностью.

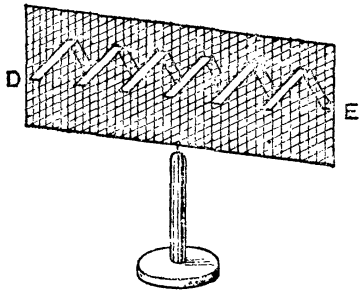


Рис. 7. Опыт, показывающий, что на плоской поверхности заряд распределён равномерно.

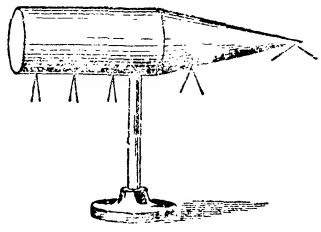


Рис. 8. Неравномерное распределение заряда по поверхности тела. Плотность заряда наибольшая на острие.

Если же кривизна поверхности заряженного проводника неодинакова, то заряды на таком проводнике будут распределены неравномерно. Поверхностная плотность зарядов будет больше там, где больше кривизна поверхности (рис. 8).

Плотность заряда в разных частях поверхности проводника можно определить на опыте, прикасаясь к ним одним и тем же небольшим пробным шариком и передавая каждый раз заряд шарика электроскопу. Заряд, который получит шарик, пропорционален плотности заряда в данном месте поверхности.

Упражнение 2.

1. Чтобы полностью передать электрический заряд с пробного шарика электроскопу, на стержень электроскопа надевают полый шар с отверстием. Затем заряженный пробный шарик вводят внутрь шара, касаясь его внутренней поверхности. Шарик при этом полностью разряжается. Проделайте такой опыт и объясните его.

2. Металлическому шару, имеющему диаметр, равный 70 *см*, передаётся заряд, равный 10^{-6} кулона. Вычислить поверхностную плотность заряда на шаре в электростатических единицах.

3. Какую долю кулона следует передать шару диаметром 1 *дм*, чтобы на каждом квадратном сантиметре поверхности шара находилась одна электростатическая единица заряда?

7. Электронная теория. Вопрос о том, что представляет собой электрический заряд, уже давно интересовал учёных. Сначала считали, что электрические явления обусловлены невесомой электрической жидкостью. Одни учёные полагали, что во всяком теле существуют две электрические жидкости: положительная и отрицательная, причём избыток одной вызывает положительную электризацию тела, а избыток другой — отрицательную. В равных количествах действия обеих жидкостей уничтожают друг друга, и тело представляется незаряженным. Другие считали, что существует только одна электрическая жидкость, и она содержится в определённом количестве во всяком незаряженном теле. Избыток её в теле вызывает положительную электризацию, недостаток — отрицательную электризацию. Однако постепенно анализ всё новых и новых опытных фактов заставил отказаться от представления о существовании электрической жидкости.

Прежде всего было обнаружено, что электричество имеет атомарную структуру, т. е. оно способно делиться на разные части, так называемые элементарные электрические заряды. К этому привело, с одной стороны, изучение прохождения электричества через растворы кислот и солей, а затем изучение электрического тока в газах. В конце концов опыт показал, что носителями элементарных электрических зарядов являются мельчайшие частички, которые переносят заряды с одних тел на другие.

Наименьшие электрические заряды, доступные нашему наблюдению в обычных опытах по электричеству, как оказалось, содержат в себе многие миллионы и миллиарды элементарных зарядов. Опыты, проведённые в конце XIX в. английским физиком Дж. Дж. Томсоном и его учениками, позволили обнаружить отдельную частицу вещества с наименьшим (элементарным) электрическим зарядом, а в дальнейшем удалось непосредственно измерить величину этого элементарного заряда.

Наименьшая частица вещества, обладающая элементарным отрицательным зарядом, называется электроном.

Электрический заряд есть одно из основных свойств электрона, неотделимое от него.

Масса электрона $m = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ *г*.

Заряд электрона $e = -4{,}8 \cdot 10^{-10}$ ед. заряда СГСЭ.

Электрон является одной из частичек, входящих в состав любого вещества. Все вещества состоят из атомов. Атом в свою очередь состоит из ядра, заряженного положительно, и электронов, движущихся вокруг ядра. Электроны, входящие в состав атомов различных веществ, совершенно одинаковы, но число их и распределение вокруг ядра различно. (Подробнее об этом будет сказано в последней главе курса.) Если атом находится в нейтральном состоянии, то положительный заряд ядра равен по абсолютной величине сумме отрицательных зарядов электронов, вращающихся вокруг ядра.

Может случиться, что атом потеряет один или несколько электронов; при этом положительный заряд ядра станет больше, чем сумма зарядов оставшихся электронов, и весь атом окажется заряженным положительно.

Если тело заряжено отрицательно, то это значит, что электроны в нём находятся в избытке, т. е. общий заряд всех электронов тела больше, чем суммарный заряд ядер. Положительная же электризация соответствует недостатку электронов в теле.

Движение электронов обусловливает перераспределение электрических зарядов в телах, отрицательную и положительную электризацию тел, электрический ток в металлах и многие другие явления.

Теория, объясняющая электрические свойства тел и многие электромагнитные явления наличием в телах элементарных заряженных частиц и их взаимодействием, называется электронной теорией.

С точки зрения электронной теории при соприкосновении двух незаряженных тел и последующем их разъединении электроны с одного из этих тел переходят на другое. То тело, на котором образуется недостаток электронов, заряжается положительно; другое же тело, на котором получается избыток электронов, становится заряженным отрицательно. Так как при этом заряды обоих знаков обнаруживаются в равных количествах, естественно допустить, что, сколько электронов теряет одно тело, столько же приобретает другое.

8. Напряжённость электрического поля. В опыте, описанном в § 3, мы вносили в электрическое поле положительно заряженного тела пробный заряд — лёгкий шарик, подвешенный на шёлковой нити (шарик имел положительный заряд). Под действием поля шарик отклонялся тем больше, чем ближе мы подносили его к телу (рис. 4).

Перемещая пробный заряд в электрическом поле любого заряженного тела, легко обнаружить, что в разных местах поля сила, с которой действует поле на пробный заряд, различна.

Если помещать последовательно в одну и ту же точку поля различные по величине пробные положительные заряды q_1, q_2, $q_3, \ldots, q_n$, то можно убедиться, что действующие на них силы F_1, F_2, $F_3, \ldots$, F_n различны, но отношение силы к величине соответствующего заряда для данной точки поля постоянно:

$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3} = \ldots = \frac{F_n}{q_n}.$$

Если подобным способом исследуем различные точки поля, то придём к следующему заключению: *для каждой точки электрического поля отношение величины силы, действующей на пробный заряд, к величине этого заряда постоянно и не зависит от величины пробного заряда.*

Стало быть, величина этого отношения может служить характеристикой электрического поля в каждой его точке. ***Величина, измеряемая отношением силы, действующей на положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда, называется напряжённостью электрического поля в данной точке:***

$$E = \frac{F}{q_1}.$$

Напряжённость поля, как это видно из определения её ***численно равна силе, действующей на единицу положительного заряда, помещённого в данную точку поля.***

За единицу напряжённости электрического поля принимают напряжённость такого поля, которое действует на заряд в одну электростатическую единицу с силой в одну дину. Такая единица называется абсолютной электростатической единицей напряжённости.

Чтобы вычислить напряжённость поля уединённого точечного заряда q в какой-нибудь произвольной точке поля A этого заряда (рис. 9), отстоящей от него на расстоянии r_1, поместим в эту точку пробный заряд q_1 и вычислим силу F_a, действующую на него в этой точке (для вакуума).

По закону Кулона:

$$F_a = \frac{q_1 q}{r_1^2}.$$

Взяв отношение величины силы к величине пробного заряда q_1, получим численное значение напряжённости поля в точке A:

$$E_a = \frac{q}{r_1^2}.$$

Точно так же можно найти напряжённость поля в точке B (рис. 9); она будет равна:

$$E_B = \frac{q}{r_2^2}.$$

Отсюда видно, что напряжённость электрического поля точечного заряда в заданной точке поля (в вакууме) прямо пропорциональна величине этого заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядом и этой точкой.

Напряжённость поля является силовой характеристикой поля. Зная напряжённость поля E в какой-нибудь его точке, легко вычислить и силу F, с которой поле будет действовать на заряд q, помещённый в эту точку:

$$F = qE.$$

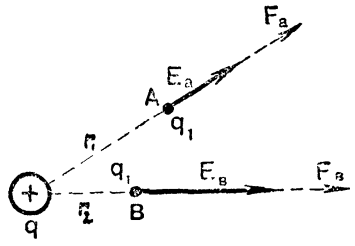


Рис. 9. К понятию напряжённости электрического поля.

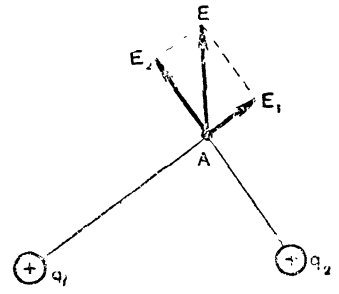


Рис. 10. Напряжённость поля двух зарядов.

Напряжённость поля есть векторная величина. Направление напряжённости в каждой данной точке поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд, помещённый в эту точку.

Если поле образовано несколькими зарядами, например двумя q_1 и q_2 (рис. 10), то напряжённость E в какой-нибудь точке A этого поля равна геометрической сумме напряжённостей E_1 и E_2, создаваемых в этой точке отдельно зарядами q_1 и q_2.

9. Графическое изображение электрических полей. Для графического изображения электрического поля можно было бы из каждой точки поля провести стрелку, указывающую величину и направление напряжённости электрического поля в этой точке. Однако такой способ изображения поля крайне неудобен, так как отдельные стрелки, накладываясь друг на друга, создали бы весьма запутанную картину.

Английский учёный Фарадей разработал более удобный способ изображения поля, которым и в настоящее время широко пользуются в различных областях физики.

Фарадей предложил изображать поле линиями, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряжённости поля в той же точке. Такие линии называются силовыми линиями поля или линиями напряжённости.

Так, например, если AB представляет собой силовую линию поля (рис. 11), то вектор напряжённости поля в какой-нибудь точке C совпадает с касательной CD, проведённой к силовой линии в этой точке. Направление вектора напряжённости в точке C отмечено на рисунке 11 стрелкой.

Силовым линиям приписывают начало у положительных зарядов и конец у отрицательных зарядов или в бесконечности. На рисунке 12, *а* изображено с помощью силовых линий поле точечного положительного заряда, а на рисунке 12, *б* — поле

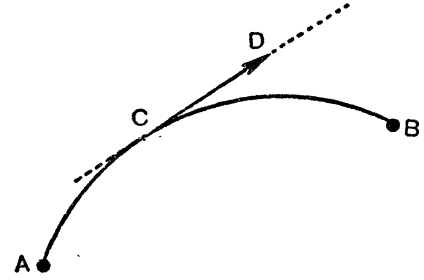


Рис. 11. Направление вектора напряжённости поля совпадает с касательной к силовой линии.

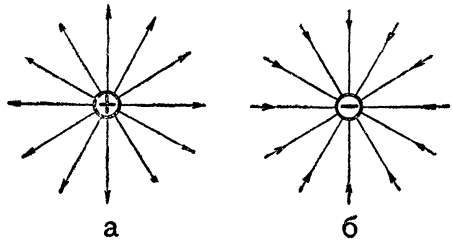


Рис. 12. Силовые линии точечного заряда: а) положительного, б) отрицательного.

точечного отрицательного заряда. Силовые линии этих полей представляют собой прямые линии.

Так как электрическое поле существует во всех точках пространства, то через любую точку можно провести силовую линию.

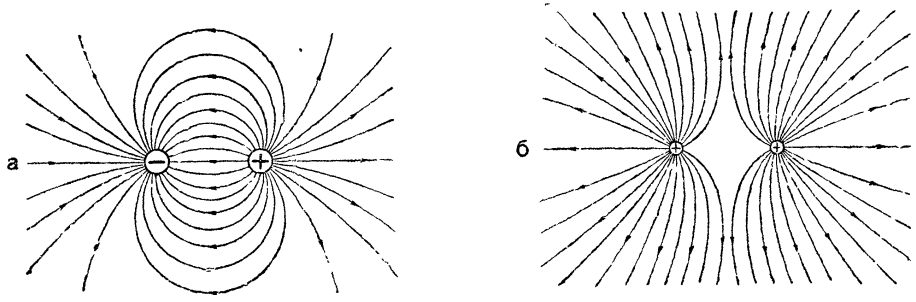


Рис. 13. Картина поля между двумя одинаковыми разноимённо (*а*) и одноимённо (*б*) заряженными телами.

А так как напряжённость поля в какой-нибудь точке имеет вполне определённую величину и направление, то, следовательно, через эту точку можно провести только одну силовую линию. Отсюда следует, что *силовые линии нигде не пересекаются.* Они могут только сходиться к заряду или расходиться от него.

На рисунке 13 в качестве примера показаны картины электрических полей, изображённых с помощью силовых линий.

По тому, как густо расположены силовые линии в поле, можно судить о величине напряжённости поля.

В качестве примера рассмотрим поле точечного положительного заряда. Силовые линии этого поля представляют собой радиальные прямые, идущие от заряда. Опишем вокруг такого заряда ряд шаровых поверхностей. На рисунке 14 показано сечение A, B, C этих поверхностей плоскостью листа. Через эти поверхности пройдут все силовые линии, выходящие из заряда. А так как поверхности шаров увеличиваются пропорционально квадрату радиуса, то число силовых линий, приходящееся на 1 $см^2$ поверхности, уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Но так же уменьшается с расстоянием и напряжённость поля; поэтому о величине напряжённости в разных точках данного поля можно судить по числу силовых линий, проходящих через 1 $см^2$ площади, перпендикулярной к силовым линиям, т. е. по густоте силовых линий.

О картине распределения силовых линий электрического поля можно получить представление из опыта. Если поместить мелкие игольчатые кристал-

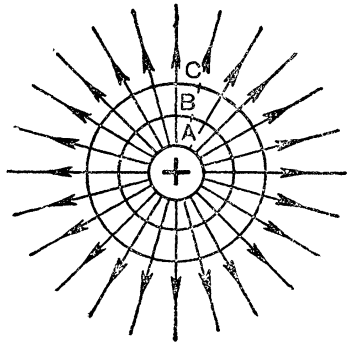


Рис. 14. Напряжённость электрического поля точечного заряда убывает пропорционально квадрату расстояния.

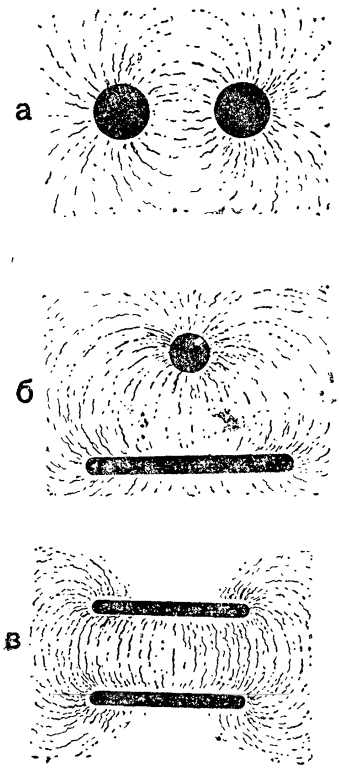


Рис. 15. Картины различных полей.

лики гипса, хинина или асбеста в какую-нибудь непроводящую жидкость (керосин, касторовое масло, вазелин и т. п.) и создать в ней электрическое поле, то под действием электрического поля кристаллики, играющие в данном случае роль пробных тел, располагаются в цепочки. Форма цепочек даёт представление о силовых линиях поля. На рисунке 15, *а*, *б* и *в* показаны картины полей, полученные при помощи кристалликов гипса. Зачернённые кружки и полоски представляют собой разноимённо заряженные проводники, вокруг которых существует электрическое поле.

10. Однородное поле. Воспользуемся описанным в предыдущем параграфе способом и получим картину поля между двумя

параллельными металлическими пластинами с равными и противоположными зарядами. На рисунке 15, *в* изображено такое поле. Это так называемое однородное поле. Мы видим, что в этом поле кристаллики гипса между пластинами располагаются вдоль параллельных линий, перпендикулярных плоскостям. Только на краях плоскостей эта параллельность заметно нарушается, кристаллики гипса расположены здесь по кривым линиям.

Поле, напряжённость которого во всех точках имеет одну и ту же величину и направление, называется однородным. Силовые линии однородного поля представляют собой параллельные прямые, густота которых всюду одна и та же.

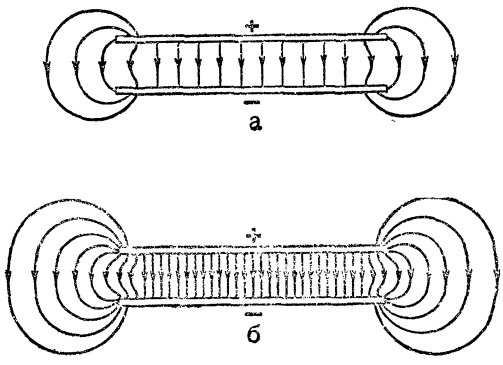


Рис. 16. Картина однородных полей разной напряжённости.

Графические изображения однородных полей отличаются друг от друга только по густоте распределения силовых линий, которая, как мы уже говорили, определяет величину напряжённости поля.

На рисунке 16 изображены картины двух однородных полей различной напряжённости, полученных между разноимённо заряженными пластинами (поля неоднородны лишь на краях пластин). Посмотрев на эти рисунки, легко решить, какое из этих двух однородных полей имеет бо́льшую напряжённость.

Однородное поле представляет собой простейший, но очень важный вид электрического поля, часто встречающийся в практике.

Упражнение 3.

1. Написать наименование единицы напряжённости электрического поля в системе СГСЭ.

2. Изобразить графически изменение напряжённости электрического поля точечного заряда в 1 эл.-ст. ед. в зависимости от расстояния.

3. Найти напряжённость поля заряда в 20 эл.-ст. ед. на расстоянии 10 *см* от заряда.

4. Поле точечного заряда q на расстоянии 5 *см* от него имеет напряжённость 10 эл.-ст. ед. Найти величину заряда q.

5. Вычислить силу, действующую на заряд в 50 эл.-ст. ед., находящийся в однородном поле напряжённостью 20 эл.-ст. ед.

6. Расстояние между двумя точечными зарядами +100 эл.-ст. ед. и −100 эл.-ст. ед. равно 10 *см*. Найти напряжённость поля в точке A, находящейся на линии, соединяющей эти заряды, на расстоянии 10 *см* от отрицательного заряда, и в точке B, находящейся на перпендикуляре, восставленном к середине линии, соединяющей оба заряда, на расстоянии 10 *см* от неё.

7. При разбрызгивании жидкости получающиеся при этом капли обычно электризуются. Одна из таких наэлектризованных капель весом 10^{-6} *г* вносится в поле между двумя параллельными разноимённо заряженными пластинками, расположенными горизонтально; при этом капля оказывается

в состоянии равновесия. Каков заряд капли, если напряжённость поля между пластинами равна 0,54 единиц СГСЭ?

11. Проводники в электрическом поле. Различные тела, как известно, по своим электрическим свойствам делятся на проводники и непроводники (диэлектрики). Одна из особенностей проводников состоит в том, что при равновесии зарядов на поверхности проводников электрическое поле внутри них отсутствует. Чем это объясняется?

Дело в том, что в проводниках имеются свободные электрические заряды. В металлах, например, носителями таких зарядов являются электроны, потерявшие связь со своими атомами. Их принято называть свободными электронами.

Свободные электроны в металлическом проводнике, помещённом в электрическое поле, под действием сил поля будут перемещаться в направлении, противоположном напряжённости поля.

На рисунке 17 изображён проводник $ABCD$, помещённый в однородное поле, напряжённость которого направлена слева направо.

На поверхности AC проводника появляется избыточный отрицательный заряд, а на другой, BD,— избыточный положительный заряд. Таким образом, проводник, помещённый в электрическое поле, электризуется. Заряды, появляющиеся на поверхности проводника, создадут внутри проводника добавочное электрическое поле. Силовые линии этого поля на рисунке 17 изображены пунктиром; они направлены противоположно силовым линиям основного поля. Напряжённость результирующего поля в проводнике ослабится, т. е. уменьшится сила, действующая на свободные электроны и вызывающая их движение. Движение зарядов в проводнике прекратится, когда напряжённость результирующего поля внутри проводника окажется равной нулю.

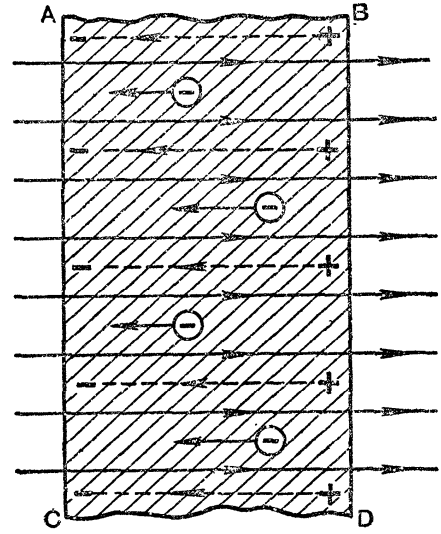


Рис. 17. Ослабление поля в проводнике.

Итак, ***при равновесии зарядов на проводнике поле внутри проводника отсутствует.*** То обстоятельство, что электрическое поле внутри проводника отсутствует, может быть использовано для защиты тел от воздействия внешнего электрического поля. Для этой цели достаточно окружить данное тело хотя бы тонким проводящим слоем, например поместить его в металлический ящик. Внутри такого ящика поля не будет.

Для доказательства того факта, что внутри заряженного проводника электрическое поле отсутствует, Фарадей построил

большую проволочную клетку, установил её на изоляторы и заряжал. Помещаясь внутрь этой клетки с очень чувствительным электроскопом в руках, Фарадей убедился в том, что внутри клетки не действуют никакие электрические силы, хотя на наружной поверхности сосредоточивался значительный заряд.

В начальном курсе физики рассматривалось появление электрических зарядов на поверхности проводника при поднесении к нему заряженного тела. Это явление называется электризацией через влияние или электростатической индукцией. Причина этого явления — действие внешнего электрического поля на свободные электроны в проводнике. Заряды, появляющиеся на проводниках при внесении их в электрическое поле, называются индуктированными зарядами.

Электризацией через влияние можно объяснить явление притяжения между наэлектризованным и ненаэлектризованным телами и передачу электрического заряда при соприкосновении этих тел.

При приближении наэлектризованного тела к лёгкому проводнику, например к пробковому шарику, подвешенному на нити, на последнем появляются индуктированные заряды обоих знаков. Заряд противоположного знака будет притягиваться к телу, а одноимённый заряд отталкиваться. Так как последний находится на стороне поверхности шарика, более удалённой от тела, то равнодействующей этих двух сил будет сила притяжения. Под действием этой силы шарик притянется к телу. При соприкосновении их индуктированный заряд противоположного знака нейтрализуется частью индуктирующего заряда, равной ему по величине. На шарике же останется заряд того же знака, что и на теле.

Так как шарик теперь имеет заряд одного знака с телом, то он оттолкнётся от тела; это мы и наблюдаем на опыте.

Упражнение 4.

1. Чтобы наэлектризовать электроскоп положительно, к шарику его приближают отрицательно наэлектризованную палочку. Затем, не удаляя палочку, на мгновение прикасаются к шарику рукой. После этого убирают палочку, и электроскоп оказывается заряженным.

Проделайте такой опыт и объясните его.

2. Зарядите таким же образом электроскоп отрицательно. Каким зарядом и какую палочку нужно для этого наэлектризовать и поднести к электроскопу? Объясните этот процесс на основе электронной теории.

3. Металлический изолированный цилиндр соединён с электроскопом. Наличие каких зарядов покажет электроскоп в следующих случаях:

а) в цилиндр вносится положительно заряженный шарик, не соприкасающийся с ним;

б) заряженным шариком прикасаются к внутренней поверхности цилиндра;

в) шарик вводится внутрь цилиндра (не касаясь его), затем прикасаются к цилиндру рукой, отнимают руку и удаляют шарик из цилиндра.

4. На изолирующей подставке установлен металлический цилиндр. Внутрь него вводится другой металлический цилиндр меньшего размера, который изолируется от первого.

Указать на чертеже распределение зарядов на поверхностях цилиндров в следующих случаях:

а) во внутренний цилиндр вносится положительно заряженный шарик, не касаясь цилиндра;

б) при наличии внутри второго цилиндра заряженного шарика внешний цилиндр заземляется;

в) при тех же условиях заземляется поверхность внутреннего цилиндра;

г) положительно заряженный шарик касается стенок внутреннего цилиндра (оба цилиндра изолированы).

12. Диэлектрики в электрическом поле. В отличие от проводников в диэлектриках почти не существует свободных зарядов. Внутри атомов и молекул диэлектриков отрицательно и положительно заряженные частицы связаны между собой электрическими силами, но не абсолютно жёстко, а могут в известной мере смещаться под действием приложенных к ним сил.

Отрицательные и положительные заряды каждой молекулы одинаковы, поэтому любая молекула в целом не заряжена. В любой части объёма диэлектрика общий положительный заряд равен отрицательному заряду и результирующее действие этих зарядов равно нулю.

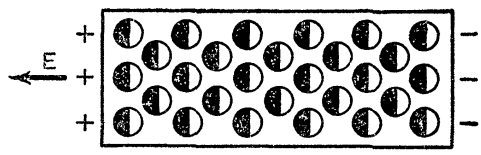


Рис. 18. Картина ориентации молекул в поляризованном диэлектрике.

Если поместить диэлектрик в электрическое поле, то на положительные и отрицательные заряды молекул его начнут действовать противоположно направленные силы. Под действием этих сил заряды каждой молекулы сместятся, причём это смещение будет происходить по направлению напряжённости поля. Силы поля будут растягивать молекулы и ориентировать их вдоль силовых линий. В результате молекулы расположатся упорядоченно (рис. 18). И в этом случае в любой части диэлектрика суммарный электрический заряд будет равен нулю. Но на поверхностях диэлектрика, ограничивающих его, появятся заряды: с одной стороны положительные, с другой — отрицательные.

Процесс смещения зарядов в диэлектрике, помещённом в поле, называется поляризацией, а сам диэлектрик в этом состоянии — поляризованным.

Поляризация диэлектрика несколько напоминает электризацию проводника через влияние. Однако между этими явлениями существует глубокое различие.

В проводниках электризация обусловливается наличием в них свободных зарядов. Если разделить в электрическом поле проводник, заряженный через влияние, то обе части проводника окажутся заряженными противоположно. Заряды остаются на проводниках и после удаления поля.

Иначе обстоит дело в случае диэлектрика. Если разделить диэлектрик в электрическом поле на две части, то на вновь образо-

ванных поверхностях обеих частей появятся заряды обоих знаков — на одной стороне положительные, на другой — отрицательные (рис 19). Заряды, появляющиеся на поверхностях поляризованного диэлектрика, называются *связанными зарядами*.

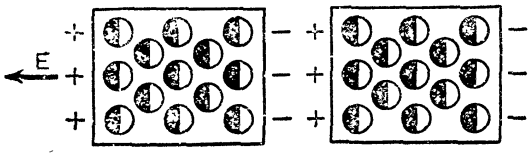


Рис. 19. При разделении диэлектрика на его концах сохраняются заряды противоположных знаков.

То обстоятельство, что в проводниках имеются свободные заряды, а в диэлектриках заряды связаны, обусловливает различие в действии на них электрического поля.

13. Диэлектрическая проницаемость. Степень поляризуемости вещества характеризуется особой величиной, которая называется *диэлектрической проницаемостью веществ*. Рассмотрим, что это за величина.

Допустим, что напряжённость однородного поля между двумя заряженными пластинами в вакууме равна E_0 (рис. 20). За-

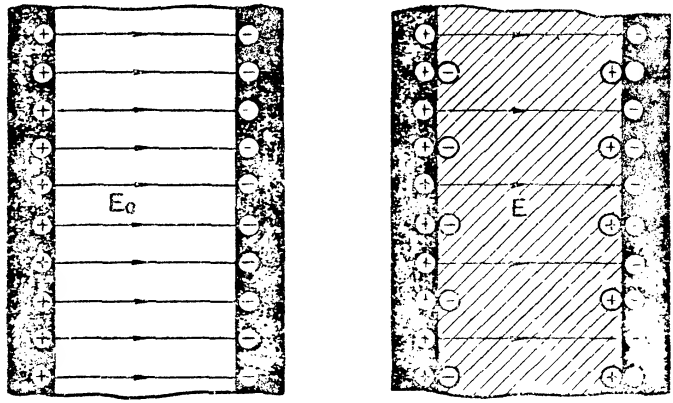


Рис. 20. Заполнение пространства между пластинами диэлектриком ведёт к уменьшению напряжённости поля между ними.

полним промежуток между этими пластинами каким-нибудь диэлектриком. Электрические заряды, появившиеся на границе диэлектрика с проводником вследствие поляризации его, нейтрализуют действие части зарядов на пластинах. В результате поле между пластинами изменяется. Напряжённость E этого поля становится меньше напряжённости E_0.

Опыт показывает, что если последовательно заполнять промежуток между пластинами разными диэлектриками, то величины напряжённости поля оказываются разными. Поэтому по величине отношения напряжённостей полей между пластинами без диэлектрика E_0 и с диэлектриком E можно судить о поляризуемости диэлектрика, т. е. о его диэлектрической проницаемости.

Эту величину принято обозначать греческой буквой ε (эпсилон). Следовательно, можно написать:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз напряжённость поля данных зарядов в диэлектрике (однородном) будет меньше, чем в вакууме.

С одним из способов измерения диэлектрической проницаемости мы ознакомимся дальше, при рассмотрении конденсатора.

Ниже в таблице приведены диэлектрические проницаемости различных веществ относительно вакуума, диэлектрическая проницаемость которого принимается за единицу.

Таблица диэлектрических проницаемостей некоторых веществ

Воздух	1,0006	Фарфор	7
Парафин	2	Стекло	4—7
Плексиглас (органическое стекло)	3—4	Слюда	4—5
Эбонит	4	Янтарь	12,8
		Вода	81

В практике диэлектрическую проницаемость воздуха принимают за единицу.

Если два точечных заряда находятся в диэлектрике, то напряжённость поля, создаваемого каждым из зарядов в точке, где находится другой заряд, уменьшается в ε раз. Значит, и сила, с которой эти заряды взаимодействуют между собой, также в ε раз меньше. Поэтому закон Кулона для зарядов, помещённых в диэлектрик, выражается формулой:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}.$$

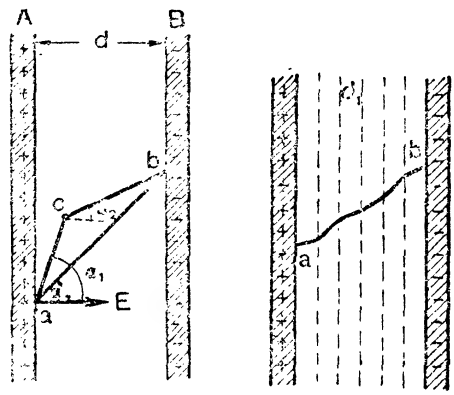


Рис. 21 Величина работы по перемещению заряда не зависит от формы пути

14. Работа в электрическом поле. На всякий заряд, находящийся в электрическом поле, действует сила, и поэтому при движении заряда в поле совершается определённая работа. Как рассчитать эту работу?

Рассмотрим перемещение заряда в однородном поле, образованном двумя параллельными пластинами *A* и *B*, заряженными противоположными зарядами (рис. 21, левый). В таком поле силовые линии на всём своём протяжении перпендикулярны к этим пластинам, и если пластина *A* заряжена положительно, то напряжённость поля *E* направлена от *A* к *B*.

Допустим, что положительный заряд *q* переместился из точки *a* к точке *b* по какому-нибудь пути *ab*=*s*.

Так как сила, действующая на заряд, находящийся в поле, равна:

$$F=qE,$$

то работа, совершённая при перемещении заряда в поле по заданному пути, определится из равенства:

$$A=Fs\cos\alpha, \text{ или } A=qEs\cos\alpha.$$

Но $s\cos\alpha=d$, где d — расстояние между пластинами.

Следовательно,

$$A=qEd.$$

Пусть теперь заряд q переместился из a в b по пути acb. Работа, совершённая на этом пути, будет равна сумме работ, совершённых на отдельных участках его: $ac=s_1$, $cb=s_2$, т. е.

$$A=qEs_1\cos\alpha_1+qEs_2\cos\alpha_2,$$

или

$$A=qE(s_1\cos\alpha_1+s_2\cos\alpha_2).$$

Но из рисунка 21 видно, что $s_1\cos\alpha_1+s_2\cos\alpha_2=d$, следовательно, и в этом случае $A=qEd$.

Наконец, представим себе, что заряд q перемещается из a в b по какой-нибудь кривой линии (рис. 21, правый). Чтобы подсчитать работу, совершённую на этом криволинейном пути, расслоим поле между пластинами A и B целым рядом параллельных плоскостей, настолько близких друг к другу, чтобы отдельные отрезки пути s между этими плоскостями можно было считать прямыми.

Тогда работа, произведённая на каждом из этих отрезков пути, будет равна $A_1=qEd_1$, где d_1 — расстояние между двумя смежными плоскостями. Полная же работа на пути d будет равна произведению qE на сумму расстояний d_1, равную d. Следовательно, и в случае криволинейного пути совершённая работа будет равна $A=qEd$.

Итак, рассмотренные нами примеры показывают, что ***работа по перемещению заряда из одной точки электрического поля в другую не зависит от формы пути перемещения, а зависит только от положения этих точек в поле.***

Мы знаем, что работа, совершаемая силой тяжести при движении тела по наклонной плоскости длиной l, равна работе, совершаемой при падении тела с высоты h, равной высоте наклонной плоскости. Таким образом, работа силы тяжести, или, можно сказать, работа при перемещении тела в поле тяжести, также не зависит от формы пути, а зависит только от разности высот начальной и конечной точек пути.

Можно доказать, что этим важным свойством обладает не только однородное, но и любое электрическое поле. Аналогичным свойством обладает и поле силы тяжести.

15. Потенциал и разность потенциалов. Пусть мы имеем некоторое положительно заряженное тело. Вокруг этого тела суще-

ствует электрическое поле. Будем в этом поле переносить положительный заряд; при этом будет совершаться определённая работа A. Величина этой работы пропорциональна величине переносимого заряда и зависит от того, из какой и в какую точку поля заряд переносится. Если взять отношение величины совершаемой работы A к величине перемещаемого заряда q, то величина этого отношения $\frac{A}{q}$ уже не будет зависеть от величины переносимого заряда, а будет зависеть только от выбора начальной и конечной точек перемещения заряда в поле, причём форма пути никакого значения иметь не будет.

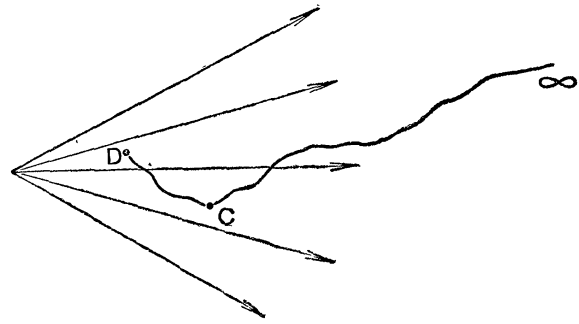


Рис. 22. К понятию разности потенциалов.

Условимся вносить заряд в поле, перемещая его из бесконечно удалённой точки поля, т. е. из такой точки пространства, напряжённость поля в которой равна нулю. Величина отношения работы, которую придётся при этом совершить против сил электрического поля, к величине переносимого заряда будет зависеть только от положения конечной точки перемещения. Поэтому эта величина может служить для характеристики этой точки поля.

Величина, измеряемая отношением работы, совершаемой при перемещении положительного заряда из бесконечности в данную точку поля, к величине перемещаемого заряда, называется потенциалом поля в данной точке.

Из этого определения видно, что ***потенциал поля в данной точке численно равен работе, совершаемой при перемещении единицы положительного заряда из бесконечности в данную точку поля.***

Величина потенциала обозначается буквой φ:

$$\varphi = \frac{A}{q}. \qquad (1)$$

Потенциал представляет собой скалярную величину. Потенциалы точек поля положительно заряженного тела имеют положительную величину, потенциалы же поля отрицательно заряженного тела имеют отрицательную величину.

Покажем, что отношение величины работы, совершаемой при перемещении положительного заряда из одной точки поля в другую, к величине перемещаемого заряда равно разности потенциалов начальной и конечной точек перемещения. Чтобы показать

это, выберем две какие-нибудь точки в электрическом поле, например точки C и D (рис. 22). Пусть потенциал точки C будет равен φ_C, а потенциал точки D — φ_D. Переместим положительный заряд q из бесконечности в точку D так, чтобы путь перемещения прошёл через точку C. Величина отношения работы A, совершаемой при перемещении заряда q из бесконечности в точку D, к величине заряда q, согласно определению, будет равна потенциалу поля в точке D. Но работу перемещения заряда из бесконечности в точку D можно рассматривать как сумму работ: работы, совершаемой при перемещении на участке от бесконечности до точки C, и работы на участке от точки C до точки D, т. е.

$$A_{\infty D}=A_{\infty C}+A_{CD}.$$

Но величина отношения работы, совершаемой на участке от бесконечно удалённой точки до точки C, к величине перемещённого заряда q будет равна потенциалу поля в точке C. Следовательно, мы можем написать:

$$\frac{A_{\infty D}}{q}=\frac{A_{\infty C}}{q}+\frac{A_{CD}}{q} \quad \text{или} \quad \varphi_D=\varphi_C+\frac{A_{CD}}{q},$$

откуда

$$\varphi_D-\varphi_C=\frac{A_{CD}}{q}. \qquad (2)$$

Разность потенциалов двух точек поля носит название напряжения поля между этими точками. Если напряжение обозначить буквой U, то равенство (2) можно будет написать в следующем виде: $\varphi_D-\varphi_C=U$.

При данном нами определении понятия потенциала потенциал бесконечно удалённой точки будет равен нулю. В этом случае говорят, что за точку нулевого потенциала поля принята бесконечно удалённая точка.

Величина потенциала в данной точке поля имеет только относительное значение, так как за нулевую точку потенциала может быть принята любая точка поля, выбор её совершенно условен.

При выборе другой точки поля в качестве точки нулевого потенциала потенциалы всех точек поля будут иметь другие значения, но изменятся они на одну и ту же величину. В результате такого изменения значений потенциалов всех точек поля разность потенциалов двух любых точек поля окажется неизменной. Следовательно, *значение разности потенциалов двух точек поля не зависит от выбора точки нулевого потенциала и имеет абсолютную величину.*

В теоретических работах за нулевую точку потенциала обычно принимают бесконечно удалённую точку. В электротехнической же практике за нулевую точку потенциала принимают любую точку поверхности Земли.

В дальнейшем мы будем определять потенциалы поля относительно поверхности Земли. В соответствии с этим дадим следующее определение потенциала поля.

Потенциалом электрического поля в данной точке называется величина, измеряемая отношением работы, совершаемой при перемещении положительного заряда с поверхности Земли в данную точку поля, к величине этого заряда.

Если напряжённость служит силовой характеристикой поля и позволяет определять величину силы, действующей на заряд, находящийся в той или иной точке поля, то потенциал является энергетической характеристикой поля. Зная потенциалы в различных точках поля, можем определять величину работы перемещения заряда из одной точки поля в другую по формулам:

$$A=qU, \text{ или } A=q(\varphi_1-\varphi_2),$$

где q — величина перемещаемого заряда, U — напряжение между точками поля и φ_1 и φ_2 — потенциалы начальной и конечной точек перемещения.

Понятие потенциала применимо ко всем полям, обладающим тем свойством, что работа перемещения в них не зависит от формы пути. Так, например, точки поля тяготения имеют те или иные значения потенциалов. Все поля, в которых работа перемещения не зависит от формы пути, получили название потенциальных полей.

16. Единицы потенциала и разности потенциалов. Единицы потенциала и разности потенциалов устанавливают, исходя из формул, определяющих эти величины.

Если в формуле $\varphi=\frac{A}{q}$ положить $A=1$ ед. работы и $q=1$ ед. заряда, то φ будет равно 1 ед. потенциала. Это значит, что за единицу потенциала принимается потенциал такой точки поля, перенос в которую с поверхности Земли единицы положительного заряда требует совершения единицы работы.

Также, если в формуле $\varphi_1-\varphi_2=\frac{A}{q}$ положить A равным единице работы и q равным единице заряда, то $\varphi_1-\varphi_2$ будет равно единице разности потенциалов. Следовательно, *за единицу разности потенциалов принимают разность потенциалов таких двух точек поля, для которых перемещение единицы заряда из одной из этих точек в другую требует совершения единицы работы.*

Для измерения потенциала и разности потенциалов применяют одни и те же единицы.

В системе СГСЭ единицей работы служит 1 эрг и единицей заряда 1 ед. заряда СГСЭ. Следовательно, единицей потенциала и разности потенциалов в этой системе будет:

$$1\frac{\text{эрг}}{\text{ед. заряда СГСЭ}}.$$

Эта единица называется абсолютной электростатической единицей потенциала или разности потенциалов (1 эл.-ст. ед. потенциала).

В системе единиц СИ единицей работы является 1 джоуль, единицей заряда 1 кулон.

Единицей разности потенциалов в этой системе будет:

$$1\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}.$$

Эта единица называется вольтом (сокращённо *в*):

$$1 \text{ вольт} = 1\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}.$$

Так как 1 *дж* $=10^7$ *э*, 1 *к* $=3\cdot10^9$ ед заряда СГСЭ, то

$$1\ в=\frac{10^7 э}{3\cdot10^9 \text{ ед. заряда СГСЭ}}=\frac{1}{300} \text{ ед. потенциала СГСЭ.}$$

17. Связь разности потенциалов с напряжённостью поля. Рассмотрим опять однородное электрическое поле. Напряжённость E во всех точках этого поля одинакова, а это значит, что сила F, действующая на единицу заряда, во всех точках такого поля одинакова и численно равна E. Сила же, действующая на заряд q в этом поле, будет равна $F=qE$.

Если расстояние между двумя какими-нибудь точками этого поля, взятого в направлении силовой линии поля, равно d, то при перемещении заряда из одной точки в другую совершится работа:

$$A=Fd=qEd=q(\varphi_1-\varphi_2),$$

где $\varphi_1-\varphi_2$ — разность потенциалов между этими точками поля.

Отсюда

$$E=\frac{\varphi_1-\varphi_2}{d}, \qquad (1)$$

т. е. ***напряжённость однородного электрического поля численно равна разности потенциалов, приходящейся на единицу длины, взятой вдоль силовой линии поля.***

В случае малых расстояний d соотношение (1) приближённо применимо и к любому неоднородному полю, так как всякое поле между двумя достаточно близко расположенными точками можно принимать за однородное.

18. Условие равновесия зарядов в проводниках. Мы видели, что в случае равновесия зарядов на проводнике поле внутри проводника отсутствует, а это значит, что напряжённость поля внутри проводника равна нулю. Но напряжённость поля E связана с разностью потенциалов, и эта связь, как было показано в предыдущем параграфе, выражается формулой:

$$E=\frac{\varphi_1-\varphi_2}{d},$$

при $E=0$ и $\varphi_1-\varphi_2=0$; следовательно, ***в случае равновесия зарядов на проводнике разность потенциалов любых двух точек проводника равна нулю, иначе говоря: ве-***

личина потенциала во всех точках проводника, как внутри него, так и на поверхности, имеет одно и то же значение.

Поверхность, у которой потенциалы во всех её точках имеют одну и ту же величину, называется эквипотенциальной поверхностью. Следовательно, поверхность любого проводника при равновесии зарядов на нём является эквипотенциальной поверхностью.

Из определения эквипотенциальной поверхности следует, что при перемещении заряда по ней электрические силы работы не совершают.

Но это может быть лишь в том случае, когда направление перемещения заряда всё время перпендикулярно к действующей силе. А это значит, что силовые линии перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям (рис. 23).

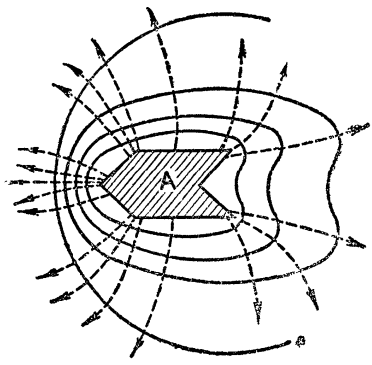


Рис. 23. Пунктирные линии изображают силовые линии заряженного тела *A*, сплошными линиями изображены сечения эквипотенциальных поверхностей.

Упражнение 5.

1. Написать наименование единицы разности потенциалов в системе СГСЭ.

2. Вычислить работу, которая производится электрическими силами при передвижении заряда в 100 эл.-ст. ед. между двумя точками поля с разностью потенциалов 1200 *в*.

3. Определить разность потенциалов двух точек поля, если при перемещении заряда в 200 эл.-ст. ед. из одной точки в другую совершается работа, равная 20 *э*.

4. Определить величину заряда, если при перемещении его из одной точки поля в другую при разности потенциалов в этих точках 300 *в* совершена работа в 500 *э*.

5. При перемещении заряда в электрическом поле совершена работа в 1 *дж*. Определить величину заряда, если его перемещение происходило при разности потенциалов 3000 *в*.

6. При перемещении между двумя точками поля заряда величиной в 1 *к* была совершена работа в 1 *кГм*. Определить разность потенциалов между этими точками.

7. Между двумя горизонтально расположенными и параллельными заряженными пластинами находится в состоянии равновесия маленькая капелька весом $3 \cdot 10^{-12}$ *Г*. Заряд капельки $9{,}6 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. ед. Определить разность потенциалов на пластинах, если расстояние между пластинами 15 *мм*.

8. В физике атома энергию выражают в электрон-вольтах. Электрон-вольт равен той энергии, которую приобретает электрон, пролетев в электрическом поле путь, разность потенциалов начальной и конечной точек которого равна 1 *в*. Выразить электрон-вольт в эргах. Какую скорость имеет электрон, обладающий энергией в 1 электрон-вольт?

19. Электрометр. Измерение разности потенциалов производится электрометрами. Электрометр представляет собой обычный электроскоп с листочками или с подвижной стрелкой (рис. 24),

который обязательно имеет металлический корпус. При измерениях корпус электрометра соединяют с землёй — заземляют. Это делается для того, чтобы защитить электрометр от действия внешних электрических полей.

Если коснуться стержня электрометра каким-либо заряженным телом, то часть заряда с тела перейдёт на стержень и стрелка отклонится от стержня на некоторый угол. От чего зависит величина этого угла?

При заряжении стержня внутри прибора возникает электрическое поле. Поверхность корпуса прибора и поверхность стержня со стрелкой представляют собой две разные эквипотенциальные поверхности; между ними имеется некоторая разность потенциалов.

Угол отклонения стрелки электрометра будет тем больше, чем с большей силой будет действовать на неё поле, т. е. чем больше будет напряжённость поля внутри электрометра. Но напряжённость поля пропорциональна разности потенциалов между корпусом и стрелкой. Следовательно, по углу отклонения стрелки от стержня можно измерять разность потенциалов между стрелкой и корпусом прибора.

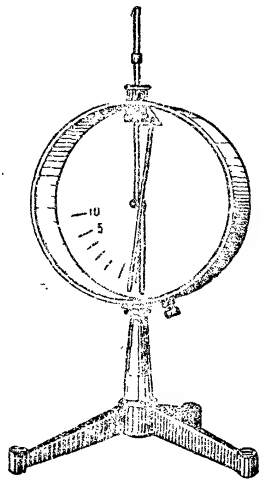


Рис. 24. Электрометр.

Если предварительно отметить на шкале прибора разности потенциалов, которым соответствуют различные отклонения стрелки, т. е. проградуировать прибор в вольтах, то по отклонению стрелки можно будет сразу определить в вольтах измеряемую разность потенциалов.

Итак, ***электрометром мы измеряем всегда разность потенциалов между стержнем и корпусом электрометра.***

Для измерения разности потенциалов между каким-нибудь заряженным проводником и землёй поступают следующим образом: соединяют проводник со стержнем электрометра, а корпус электрометра заземляют. При этом потенциал стержня и стрелки практически становится равным потенциалу исследуемого проводника, а потенциал корпуса — потенциалу земли. Разность потенциалов между стержнем и корпусом будет равна разности потенциалов между исследуемым проводником и землёй.

Соединим проволокой заряженный проводник A (рис. 25) со стержнем электрометра и будем перемещать проволоку по поверхности проводника. Наблюдая за показаниями электрометра, мы заметим, что они не изменяются, что и следовало ожидать, так как поверхность проводника есть эквипотенциальная поверхность.

В заключение рассмотрим, в чём же состоит различие между электрометром и электроскопом.

У электроскопа нет металлического корпуса. Эту роль у него выполняют стены комнаты, потолок и различные другие предме-

ты, окружающие электроскоп. Угол расхождения листочков его зависит от случайного расположения всех этих предметов. Поэтому для точного суждения о величине разности потенциалов электроскоп не пригоден.

Так как разность потенциалов стержня и корпуса электрометра связана с величиной заряда, передаваемого стержню прибора, то по показаниям как электрометра, так и электроскопа мы можем судить о величине этого заряда.

20. Электроёмкость. С понятиями «конденсатор», «ёмкость конденсатора», «фарада», «микрофарада» и т. д. сейчас приходится встречаться всякому, кто имеет дело с радио. Чтобы сознательно и успешно пользоваться этими понятиями, надо прежде всего отчётливо представлять себе, что такое электроёмкость.

Для выяснения этого понятия обратимся к опыту. Наденем на стержень электрометра металлический полый шар с отверстием наверху; корпус электрометра заземлим.

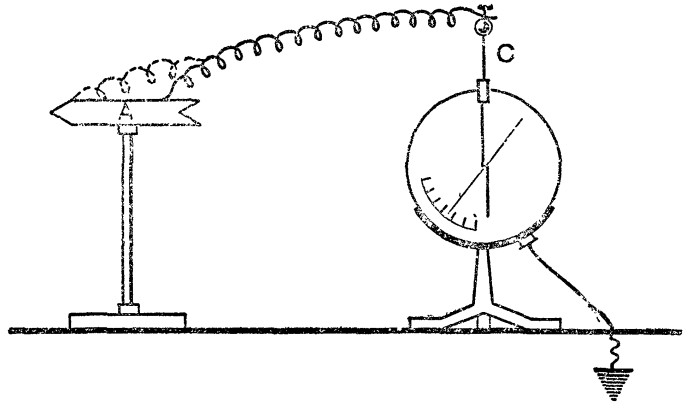


Рис. 25. Опыт, показывающий, что поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью.

Пока шар не заряжен и все окружающие шар предметы заземлены, стрелка электрометра не отклоняется, указывая на то, что разность потенциалов между шаром и землёй равна нулю, иначе говоря: потенциал шара относительно земли равен нулю.

Касаясь пробным шариком внутренней поверхности шара (рис. 26), будем передавать ему последовательно по заряду q. Мы заметим, что по мере увеличения заряда на шаре растёт потенциал шара относительно земли. Причём при заряде q, $2q$, $3q$ и т. д. потенциал шара принимает значения φ, 2φ, 3φ и т. д., возрастая пропорционально величине заряда. Если подобный же опыт проделать с другим каким-нибудь проводником, то мы опять получим ту же самую зависимость между зарядом и потенциалом проводника. Отношение же величины заряда на любом проводнике к его потенциалу (или, что то же, к разности потенциалов между проводником и землёй) есть величина постоянная. Поэтому величина этого отношения может служить характеристикой данного проводника.

Величина, измеряемая отношением заряда проводника к потенциалу проводника, называется электроёмкостью проводника или просто ёмкостью проводника. Обозначая её буквой C, можно написать:

$$C=\frac{q}{\varphi}.$$

Если передавать один и тот же заряд различным проводникам, находящимся в одинаковых условиях, то их потенциалы по отношению к земле будут различны. Так, например, если передавать одинаковые заряды двум изолированным металлическим шарам различных радиусов и измерять их потенциалы электрометром, то окажется, что потенциал шара с меньшим радиусом получается выше потенциала шара с бóльшим радиусом (рис. 26). Следовательно, ёмкость проводника зависит от его размеров.

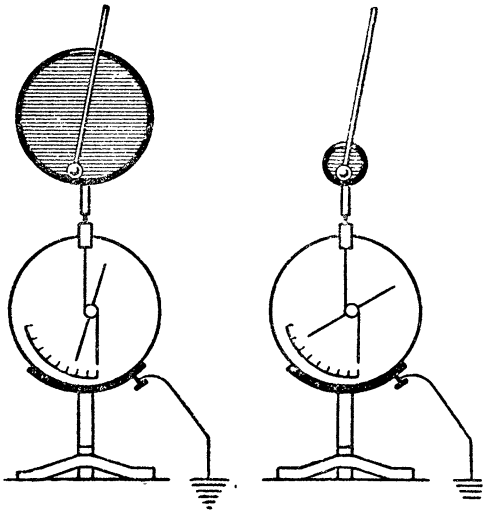


Рис. 26. К понятию электроёмкости.

В XVII—XVIII вв. электричество представляли себе как некую невесомую электрическую жидкость, которая могла «вливаться» в проводник и «выливаться» из него. Отсюда понятно возникновение термина «электроёмкость» проводника.

На ёмкость проводника существенное влияние оказывают окружающие проводник тела.

Если заряженный шар охватить ладонями, не касаясь его, то электрометр, соединённый с ним, покажет уменьшение потенциала. Такое уменьшение потенциала при неизменности заряда на шаре указывает на возрастание электроёмкости шара. Это относится и к любому другому проводнику.

Электроёмкость проводника по отношению к каким-нибудь другим телам зависит от его расположения относительно этих тел. При перемещении проводника среди этих тел ёмкость его изменяется. Но если окружающие предметы удалить от проводника достаточно далеко, то практически они уже не будут влиять на величину ёмкости проводника. Ёмкость такого «уединённого» проводника зависит от его размеров и формы. Ёмкость проводника не зависит от материала проводника.

21. Единицы электроёмкости. Чтобы получить единицу электроёмкости, надо в выражении $C=\frac{q}{\varphi}$ положить $q=1$ ед. заряда, $\varphi=1$ ед. потенциала, тогда $C=1$ ед. ёмкости.

За единицу ёмкости в системе единиц СИ принимается 1 фарада (ф). Это ёмкость проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при изменении заряда на нём в 1 кулон:

$$1 \text{ фарада} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}}.$$

Одна миллионная доля фарады называется микрофарадой (*мкф*):

$$1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф}.$$

Миллионная доля микрофарады называется пикофарадой (*пф*):

$$1 \text{ пф} = 10^{-6} \text{ мкф}.$$

В системе СГСЭ за единицу ёмкости принимается ёмкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 ед. потенциала СГСЭ при изменении заряда на нём в 1 ед. СГСЭ. Такая единица называется электростатической единицей ёмкости:

$$1 \text{ ед. ёмкости СГСЭ} = \frac{1 \text{ ед. заряда СГСЭ}}{1 \text{ ед. потенциала СГСЭ}}.$$

Подставив в правую часть написанного выше равенства наименование единиц количества электричества и потенциала в системе СГСЭ, мы получим наименование эл.-ст. ед. ёмкости.

Осуществив такую операцию (которую предлагаем проделать самим учащимся), мы установили бы, что наименование единицы ёмкости в системе СГСЭ есть сантиметр. Значит, ёмкость в системе СГСЭ измеряется в сантиметрах.

Рассмотрим, какой смысл имеет оценка величины ёмкости в сантиметрах. Можно доказать, что потенциал уединённого заряженного шара, находящегося в вакууме, вычисляется по формуле:

$$\varphi = \frac{q}{r}.$$

Подставив это значение потенциала в выражение ёмкости шара $C = \frac{q}{\varphi}$, получим $C = r$.

Следовательно, ёмкость шарового проводника в пустоте, выраженная в единицах системы СГСЭ, равна его радиусу, измеренному в сантиметрах. Таким образом, когда мы говорим, что ёмкость данного проводника равна стольким-то сантиметрам, то это значит, что данный проводник обладает такой же ёмкостью, какой обладает уединённый проводящий шар, радиус которого равен тому же числу сантиметров:

$$1 \text{ ф} = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ ед. заряда СГСЭ}}{1/300 \text{ ед. потенциала СГСЭ}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ ед. ёмкости СГСЭ},$$

или

$$1 \text{ ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}; \quad 1 \text{ мкф} = 9 \cdot 10^5 \text{ см}; \quad 1 \text{ пф} = 0{,}9 \text{ см}.$$

22. Конденсатор. Ёмкость проводника, как мы видели, можно увеличить, приблизив к нему другой проводник.

Два проводника, изолированные один от другого и помещённые вблизи друг друга, образуют конденсатор.

Проводники, образующие конденсатор, заряжают равными по величине и противоположными по знаку зарядами.

Широкое применение в практике находит плоский конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных металлических пластин, разделённых слоем диэлектрика. Расстояние между пластинами мало по сравнению с размером пластин. Пластины конденсатора часто называют обкладками конденсатора.

Чтобы зарядить пластины равными разноимёнными зарядами, можно присоединить их к полюсам электрической машины (рис. 27). При этом на одну из пластин, A, перейдёт отрицательный заряд, т. е. к ней добавится некоторое количество избыточных электронов, на другой же пластине, B, появится равный по величине положительный заряд, т. е. соответствующее число электронов с неё будет удалено.

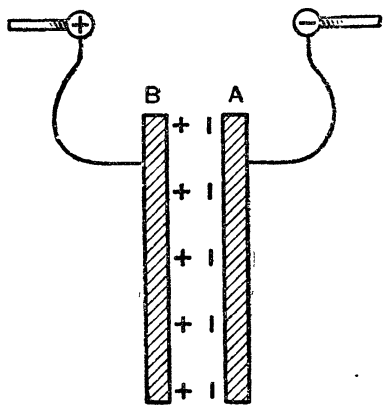


Рис. 27. Зарядка конденсатора.

Можно соединить одну из пластин с полюсом машины, а другую заземлить; при этом на другой пластине по индукции появится заряд, равный по величине и противоположный по знаку заряду первой пластины. Если пластину A зарядить положительно (рис. 28, $а$), то пластина B по индукции заряжается отрицательно; положительный же заряд пластины B нейтрализуется электронами, притекшими на пластину с земли, которая является практически неисчерпаемым источником их. Притягиваясь к положительному заряду пластины A, отрицательный заряд B располагается по её внутренней поверхности, обращённой к A.

В случае если пластина A заряжена отрицательно (рис. 28, $б$), то свободные электроны пластины B отталкиваются от пластины A и уходят в землю, пластина B при этом заряжается положительно.

В обоих случаях заряды сосредоточиваются только на обращённых друг к другу поверхностях A и B.

Отсутствие зарядов на наружных сторонах пластин даёт возможность полностью передавать заряды конденсатору через наружные стороны пластин. Этим мы воспользуемся в дальнейших наших опытах. Заряд конденсатора определяется зарядом одной из его пластин, так как на другой пластине по индукции возникает равный по величине заряд.

Соединим одну пластину конденсатора со стержнем электрометра, а другую пластину и корпус электрометра заземлим. С помощью пробного шарика будем передавать конденсатору заряды

последовательно равными порциями. Мы заметим, что при увеличении заряда в 2, 3, 4 и т. д. раза соответственно в 2, 3, 4 и т. д. раза возрастает разность потенциалов конденсатора.

Величина, измеряемая отношением заряда конденсатора к разности потенциалов его пластин (или обкладок), называется ёмкостью конденсатора.

Обозначая ёмкость конденсатора буквой C, можно написать:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

Электрическое поле конденсатора практически сосредоточено между пластинами внутри конденсатора, поэтому окружающие конденсатор тела не влияют на его ёмкость.

В § 20 понятие электроёмкости было дано для «уединённого» проводника. Практически же мы всегда имеем дело с системой проводников, т. е. с конденсатором. Действительно, шар, насаженный на стержень электрометра (рис. 26), которым мы пользовались в опытах, описанных в § 20, по существу представляет собой вместе со стержнем и стрелкой электрометра одну из обкладок конденсатора. Другой обкладкой этого конденсатора является заземлённый корпус электрометра.

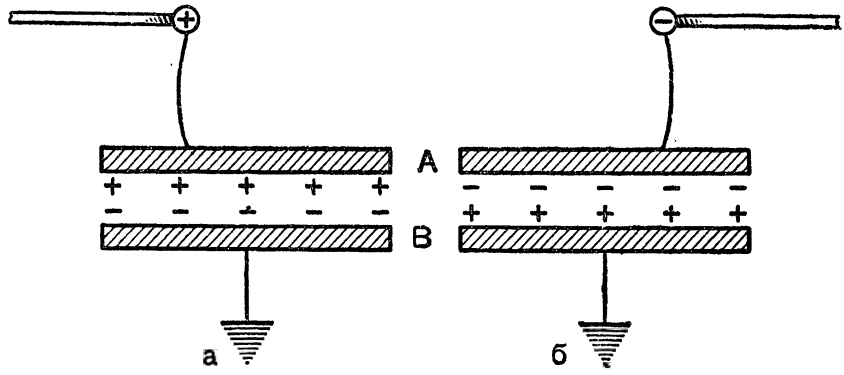


Рис. 28. При зарядке конденсатора одна из пластин заземляется.

Электрометр сам представляет собой конденсатор, одной из обкладок которого является стержень со стрелкой, а другой — корпус, причём величину ёмкости электрометра можно считать постоянной (движение стрелки мало изменяет ёмкость электрометра).

Электроскоп, конечно, тоже можно рассматривать как конденсатор, но, в отличие от электрометра, второй обкладкой его являются окружающие электроскоп тела. Так как положение этих тел может меняться, то ёмкость электроскопа не является постоянной величиной. При передаче ему одного и того же заряда в различных случаях он покажет разную величину потенциала.

23. Зависимость электроёмкости плоского конденсатора от его размеров и рода диэлектрика. На рисунке 29а изображён плоский

конденсатор, состоящий из двух металлических пластин *A* и *B*, укреплённых на изоляторах.

Соединим с электрометром пластину *A*, пластину же *B* заземлим. Зарядим пластину *A*. Электрометр отметит при этом некоторую разность потенциалов пластин конденсатора. Если приближать пластину *B* к *A*, то можно заметить, что разность потенциалов между пластинами уменьшается.

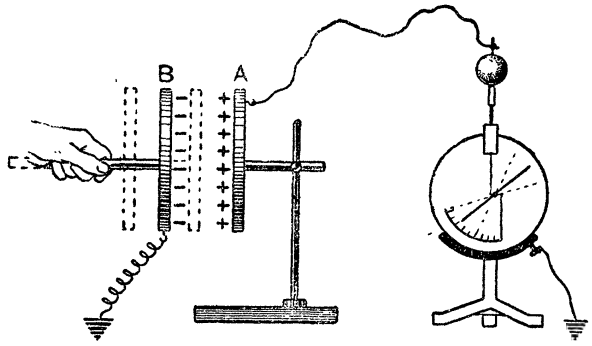


Рис. 29а. Ёмкость конденсатора увеличивается при уменьшении расстояния между его пластинами.

Уменьшение разности потенциалов пластин конденсатора при неизменном заряде на нём указывает на увеличение ёмкости конденсатора.

Таким образом, ёмкость плоского конденсатора тем больше, чем меньше расстояние между пластинами или чем меньше толщина диэлектрика (в нашем опыте — воздуха), заключённого между пластинами.

Сдвигая пластину *B* относительно пластины *A* вверх и вниз, мы будем менять площади пластин, взаимно перекрывающих друг друга. Наблюдая при этом за показаниями электрометра, можно установить, что, чем больше площадь взаимно перекрывающихся пластин конденсатора, тем больше его ёмкость. Чем больше площадь пластин конденсатора, тем больший заряд можно сосредоточить на них при данной разности потенциалов.

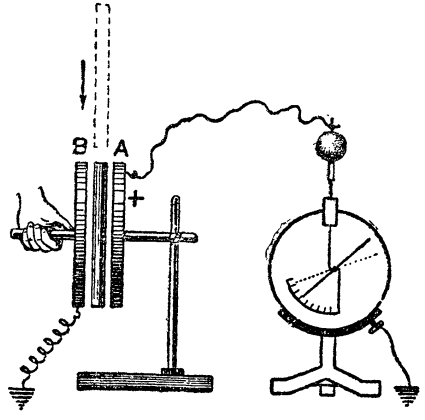


Рис. 29б. Диэлектрик между пластинами конденсатора увеличивает его ёмкость.

Проделаем ещё один опыт. Установим пластины конденсатора *A* и *B* на некотором расстоянии друг от друга. и пластину *A* зарядим (рис. 29б).

Заметим величину разности потенциалов, когда между пластинами находится воздух. Вложим между пластинами лист стекла или какой-нибудь другой диэлектрик; мы заметим, что разность потенциалов между пластинами уменьшится. Чтобы довести эту

разность потенциалов до прежнего значения, необходимо перенести на пластину A дополнительный заряд. Стало быть, замена воздушного слоя между пластинами каким-нибудь другим диэлектриком увеличивает ёмкость конденсатора.

Причина этого явления станет ясной, если мы вспомним, что вследствие поляризации диэлектрика напряжённость электрического поля в нём в ε раз меньше, чем в пустоте. Соответственно в ε раз уменьшается разность потенциалов на обкладках конденсатора и в ε раз увеличивается его ёмкость.

Пусть C_0 — ёмкость конденсатора, когда между обкладками его пустота или воздух, а C — ёмкость того же конденсатора, заполненного диэлектриком (твёрдым или жидким).

Разделив C на C_0, найдём диэлектрическую проницаемость диэлектрика ε:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}.$$

Чем больше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем больше ёмкость конденсатора.

Расчёты, которые выходят за пределы нашего курса, показывают, что ёмкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади его пластины, диэлектрической проницаемости и обратно пропорциональна толщине диэлектрика, что выражается следующей формулой:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}.$$

В этой формуле S — площадь одной из пластин в $см^2$; d — расстояние между пластинами (толщина диэлектрика) в $см$; ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами; $\pi = 3{,}14$.

Нетрудно видеть, что величина ёмкости, вычисленная по приведённой выше формуле, выражается в сантиметрах.

Уменьшая толщину диэлектрика между пластинами, можно получить конденсатор большой ёмкости. Однако беспредельно уменьшать толщину слоя диэлектрика нельзя. С уменьшением толщины диэлектрика, при неизменной разности потенциалов на пластинах конденсатора, растёт напряжённость поля конденсатора, которая, достигнув определённой величины, вызовет пробой диэлектрика.

В случае воздуха, например, пробой получается при напряжённости поля порядка 30 000 $\frac{в}{см}$. Поэтому на всяком конденсаторе, кроме его ёмкости, указывается предельное напряжение, которое может быть приложено к конденсатору.

Упражнение 6.

1. Два металлических шара, один большего, другой меньшего радиуса, заряжаются одинаковыми зарядами. Если соединить шары проводником, будут ли переходить заряды с одного шара на другой?

2. Два металлических шара, один большего радиуса, другой меньшего, заряжены до одинакового потенциала относительно земли. Одинаковы ли заряды на шарах? Будут ли переходить заряды от одного шара к другому при соединении их проводником?

3. Два наэлектризованных шара, один радиуса r_1, другой радиуса r_2, соединили очень тонкой проволокой. Докажите, что после перераспределения зарядов плотность их на шарах будет обратно пропорциональна радиусам шаров.

4. Шар диаметром 40 *см*, наэлектризованный до потенциала, равного 1000 *в*, соединяется проволокой с внутренней обкладкой лейденской банки, наружная обкладка которой заземлена. После этого потенциал шара сделался равным 100 *в*. Определить ёмкость лейденской банки.

5. Ёмкость электрометра можно определить следующим образом. Заряжают электрометр до некоторого потенциала φ относительно земли, а затем присоединяют к нему изолированный незаряженный и достаточно удалённый от электрометра шар с радиусом r. После перераспределения заряда электрометра между шаром и электрометром электрометр показал потенциал Φ_1. Выразить ёмкость электрометра C.

6. Воздушный конденсатор, заряженный до напряжения U, соединяется параллельно с одинаковым по размерам незаряженным конденсатором, заполненным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε. После этого соединения напряжение на конденсаторах делается равным U_1. Какова диэлектрическая проницаемость ε?

7. Пластины плоского конденсатора присоединяются к полюсам батареи в 220 *в*. Ёмкость конденсатора равна $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *мкф*. Чему будет равен заряд конденсатора, если расстояние между пластинами удвоить? Изменится ли заряд, если одну из пластин соединить с землёй?

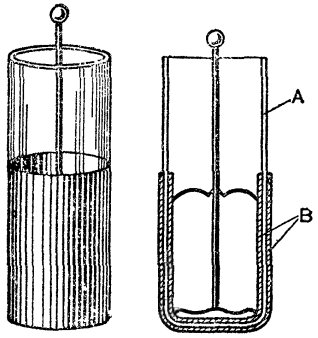


Рис. 30. Лейденская банка.

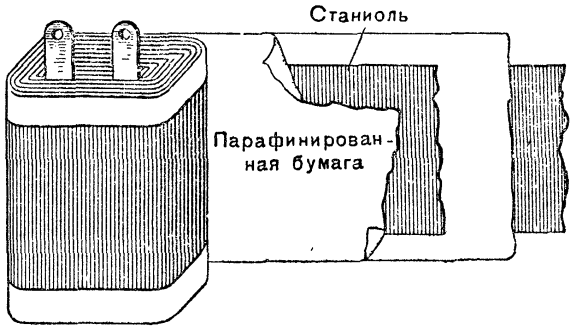


Рис. 31. Внутреннее устройство конденсатора.

24. Различные виды конденсаторов. Конденсаторы находят широкое применение в технике связи, например в телефонии, в радиотехнике, а также в цепях переменного тока. В зависимости от своего назначения конденсаторы делятся на конденсаторы постоянной ёмкости и конденсаторы переменной ёмкости.

Одним из самых старых типов конденсаторов является лейденская банка (рис. 30), которую можно встретить в любом школьном физическом кабинете. Название своё этот конденсатор получил от голландского города Лейдена, где впервые в середине XVIII в. он был построен.

Лейденская банка состоит из стеклянного цилиндра *A*, внутри и снаружи оклеенного станиолем *B*. Внутренняя обкладка соединяется с металлическим стержнем, оканчивающимся шариком. При зарядке шарик соединяют с полюсом электрической машины, а наружную обкладку — с землёй или с противоположным полюсом машины.

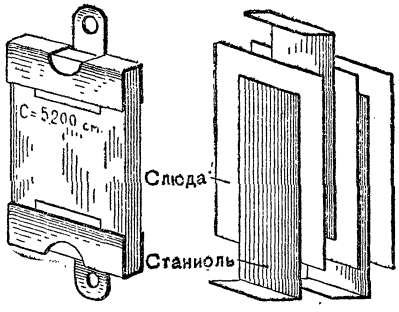


Рис. 32—33. Внешний вид и части слюдяного конденсатора.

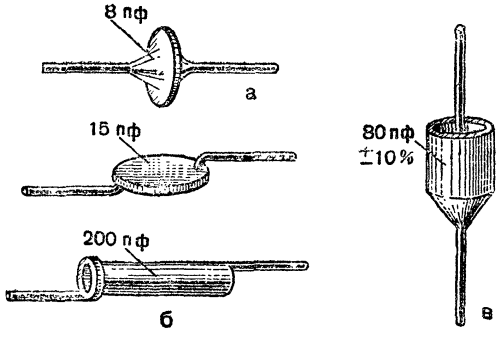


Рис. 34. Вид керамических конденсаторов.

Разряд лейденской банки производится при помощи специального разрядника. Разряжать банку, прикасаясь к её обкладкам руками, опасно для жизни.

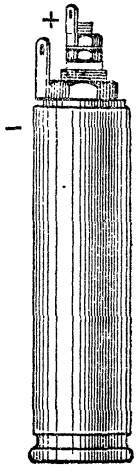


Рис. 35. Электролитический конденсатор.

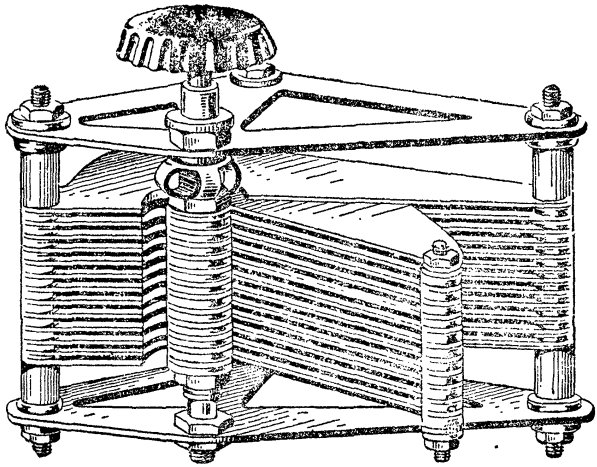


Рис. 36. Конденсатор переменной ёмкости.

На рисунке 31 изображён широко распространённый в электротехнике и радиотехнике конденсатор. Такие конденсаторы обычно делаются из станиолевых и бумажных (парафинированных) лент, плотно свёрнутых в спираль.

В радиотехнике применяются слюдяные конденсаторы. Обкладки в этих конденсаторах делаются из свинцово-оловянной или алюминиевой фольги. Ёмкость слюдяных конденсаторов — от десятков пикофарад до десятков тысяч пикофарад; напряжения, при которых могут работать эти конденсаторы, порядка сотен и тысяч вольт. На рисунках 32, 33 показан внешний вид и отдельные части такого конденсатора.

В последнее время слюдяные конденсаторы в радиотехнике стали заменять керамическими конденсаторами (рис. 34). Диэлектриком в них служит специальная керамика. Обкладки керамических конденсаторов изготовляются в виде слоя серебра, нанесённого на поверхность керамики и защищённого слоем лака. Керамические конденсаторы изготовляются на ёмкости от единиц до сотен пикофарад и на напряжения от сотен до тысяч вольт.

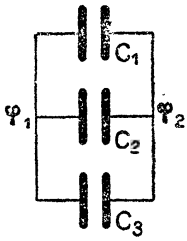


Рис. 36а. Параллельное соединение конденсаторов.

Большими ёмкостями (до нескольких тысяч микрофарад) при малых размерах и весе обладают электролитические конденсаторы (рис. 35).

Пластинами электролитического конденсатора служат длинные полосы алюминиевой фольги, между которыми проложена фильтровальная бумага, пропитанная электролитом. Положительная пластина покрывается тонким слоем окиси (оксидируется), а отрицательная пластина не оксидируется и служит лишь для контакта с электролитом, который фактически выполняет роль второй обкладки конденсатора. Диэлектриком служит весьма тонкая оксидная плёнка, отделяющая анодную пластину от электролита. Ленты свёртываются в плотный рулон, который помещается в алюминиевый или картонный корпус. Металлический корпус конденсатора соединён с электролитом.

Благодаря очень малой толщине оксидной плёнки, ёмкость электролитических конденсаторов огромна и достигает многих микрофарад на $дм^2$ площади пластин.

Конденсаторы переменной ёмкости, также широко применяемые в радиотехнике, в большинстве случаев бывают воздушные. Такой конденсатор (рис. 36) состоит из двух систем металлических пластин, изолированных друг от друга. Одна система пластин неподвижна, другая может поворачиваться вокруг оси. Вращая подвижную систему, плавно изменяют ёмкость конденсатора.

На практике для получения нужной величины ёмкости соединяют конденсаторы в батареи.

На рисунке 36а изображена схема параллельного соединения конденсаторов.

Емкость батареи параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёмкостей отдельных конденсаторов: $C=C_1+C_2+C_3$.

ГЛАВА II

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

25. Условия возникновения и существования электрического тока. ***Электрическим током называют направленное (упорядоченное) движение электрических зарядов.***

Электрический ток можно получить, например, в проводнике, который соединяет заряженное тело A с незаряженным телом B. Однако этот ток прекратится, как только разность потенциалов тел A и B станет равной нулю (рис. 37). При этом часть заряда, оказавшаяся на проводнике, соединяющем тела, распределится вдоль проводника равномерно.

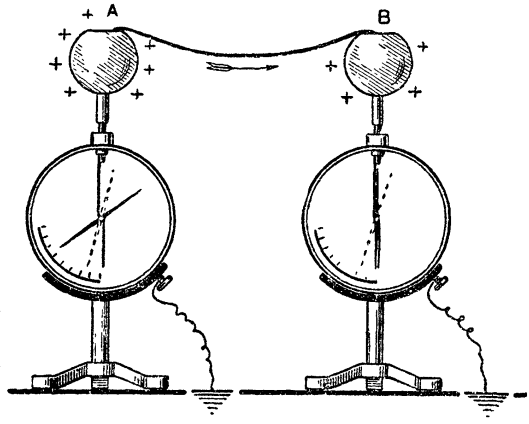


Рис. 37. Ток идёт от тела A к телу B. Ток прекратится, когда потенциалы тел A и B станут равными.

Упорядоченное движение зарядов, т. е. электрический ток, будет существовать также в проводнике, соединяющем пластины заряженного конденсатора. В этом случае ток сопровождается нейтрализацией зарядов, находящихся на пластинах конденсатора, и продолжается до тех пор, пока разность потенциалов пластин конденсатора не станет равной нулю. (Подробнее см. § 110.)

Эти примеры показывают, что электрический ток в проводнике возникает лишь при наличии на концах проводника разных потенциалов, т. е. тогда, когда в проводнике существует электрическое поле.

Но в рассмотренных примерах ток не может быть длительным, так как в процессе перемещения зарядов потенциалы тел быстро выравниваются и электрическое поле в проводнике исчезает.

Следовательно, для получения тока в проводнике необходимо поддерживать на концах его разные потенциалы. Это можно осуществлять различными способами. Можно было бы, например, непрерывно заряжать тело A и разряжать тело B или заряжать

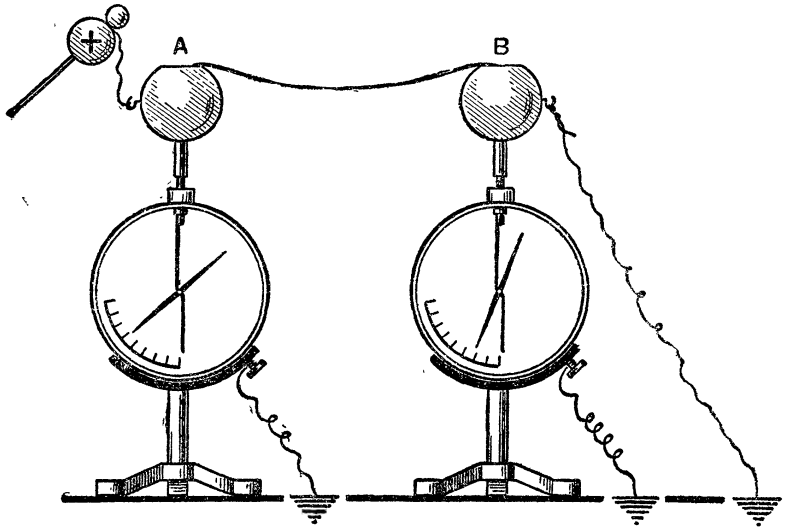


Рис. 37а. Ток идёт от заряжаемого тела A к заземлённому телу B.

тело A положительным зарядом, а тело B — отрицательным. Можно было бы также тело A заряжать от электрической машины, а тело B заземлить (рис. 37а).

Но можно поддерживать непрерывный ток в проводнике, перенося обратно заряды с тела B на тело A по другому проводнику, образуя для этого замкнутую цепь (рис. 37б). Однако под действием сил этого же электрического поля такой перенос зарядов невозможен, так как потенциал тела B меньше потенциала тела A. Перенос зарядов с тела B на тело A может быть совершён только с помощью сил неэлектрического происхождения. Наличие таких сил обеспечивает источник тока, включаемый в цепь.

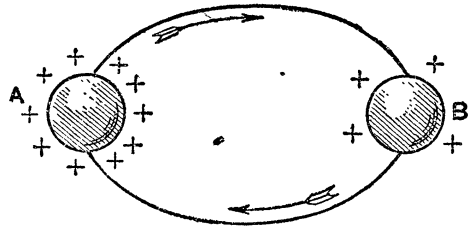


Рис. 37б. На верхнем участке цепи перенос зарядов происходит под действием сил электрического поля; на нижнем участке для переноса зарядов нужен источник тока (на рисунке он не показан).

Силы, действующие в источнике тока, переносят заряд от тела с меньшим потенциалом к телу с бóльшим потенциалом и совершают при этом работу. Следовательно, источник тока должен обладать энергией.

Источниками тока являются электрические машины, гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы и др.

Из изложенного вытекает, что для получения длительного электрического тока необходимо иметь источник тока. Ряд соединённых между собой проводников вместе с источником тока составляют замкнутую электрическую цепь.

На рисунке 37в дана схема электрической цепи, в которой находится источник. На внешнем участке этой цепи положительные заряды движутся под действием электрических сил поля от точек с высшим потенциалом к точкам с низшим потенциалом, на внутреннем же участке цепи BA переход зарядов от B к A осуществляется силами, действующими в источнике.

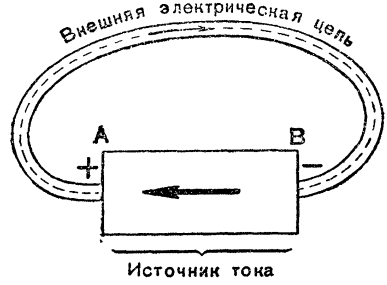


Рис. 37в. Замкнутая цепь с источником тока.

Для выяснения процессов, протекающих в замкнутой цепи, можно воспользоваться следующей моделью. Представим себе винтообразную наклонную поверхность. Если на верху этой поверхности помещать шарики, то они под действием силы тяжести будут скатываться к её основанию.

Действие силы тяжести здесь аналогично действию электрических сил поля в замкнутой цепи. Но для обеспечения непрерывного движения шариков по наклонной поверхности шарики должны подниматься с основания на её вершину. Такое перемещение возможно только под действием иных сил, чем сила тяжести. Действие таких сил аналогично действию сил в замкнутой цепи на участке источника тока.

Итак, для получения тока необходимым условием является наличие замкнутой цепи, содержащей источник тока.

26. Постоянный ток. Направление тока. Действия тока. Если в замкнутой электрической цепи разность потенциалов двух любых точек проводника не меняется, то ток, текущий по этой цепи, является постоянным током. Внутри проводника при этом существует постоянное электрическое поле.

При постоянном токе за равные промежутки времени через поперечное сечение проводника в любом участке неразветвлённой цепи протекает одинаковый по величине заряд.

Электрический ток представляет собой направленное движение положительных или отрицательных зарядов или одновременно тех и других зарядов. При этом токи, обусловленные различными по знаку зарядами, движущимися в противоположные стороны, равноценны друг другу.

За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов под действием сил электрического поля.

Прохождение тока по цепи сопровождается рядом легко наблюдаемых явлений. Так, например, в некоторых жидкостях при прохождении по ним тока наблюдается выделение вещества на электродах, опущенных в жидкость. Ток в газах часто сопровождается свечением газов. При прохождении тока по проводнику последний нагревается. Наконец, в пространстве, окружающем проводник с током, появляется магнитное поле.

Ампер Андре Мари (1775—1836) — выдающийся французский физик и математик. Он создал первую теорию, которая выражала связь электрических и магнитных явлений. Амперу принадлежит гипотеза о природе магнетизма, сыгравшая большую роль в развитии учения об электромагнитных явлениях: магнитные свойства тел обусловлены наличием в телах молекулярных электрических токов. Ампер ввёл в физику понятие «электрический ток». Его именем названа единица тока — *ампер*.

Таким образом, электрический ток может быть обнаружен по химическому, световому, тепловому и магнитному его действиям, причём магнитное действие тока имеет место всегда, когда проходит ток по проводнику, какой бы проводник ни был — твёрдый, жидкий или газообразный.

Пропустив ток через трубку с раствором серной кислоты, можно одновременно наблюдать выделение из раствора газов, нагревание раствора и отклонение магнитной стрелки, помещённой вблизи трубки.

27. Мера тока. Единицы тока. Когда по проводнику протекает постоянный ток, то через любое сечение этого проводника в каждую секунду протекает один и тот же электрический заряд.

Величина, измеряемая отношением заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за какой-нибудь промежуток времени, к величине этого промежутка, называется силой тока[1] или просто током.

Если за t секунд через поперечное сечение проводника проходит заряд q, то ток I будет определяться следующим равенством:

$$I=\frac{q}{t}.$$

Так как единицы заряда установлены, то этим определяется и выбор единиц тока.

[1] Термин «сила тока» в электротехнике в настоящее время заменён термином «ток».

За единицу тока принимают 1 ампер. В системе СИ ампер является основной единицей и определяется по магнитным действиям тока (см. приложение).

Одна тысячная доля ампера называется миллиампером (*ма*). Миллионная доля ампера называется микроампером (*мка*):

$$1a = 10^3\ ма = 10^6\ мка.$$

Отношение тока I в проводнике к площади поперечного сечения проводника S называется плотностью тока i:

$$i = \frac{I}{S}.$$

Приборы для измерения тока, как известно, называются амперметрами.

Включая в различные места последовательной цепи, изображённой на рисунке 38, амперметры, мы заметим, что они показывают один и тот же ток. Как и следовало ожидать, ток во всех частях последовательно соединённой цепи в каждый данный момент времени один и тот же.

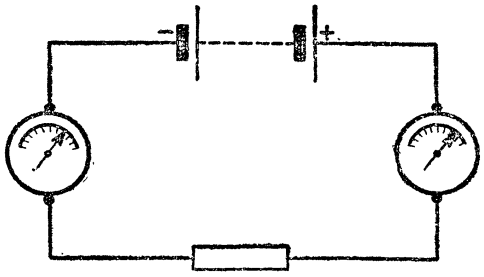


Рис. 38. Ток во всех участках последовательной цепи одинаков.

Ток, текущий по проводнику, определяется числом носителей зарядов в 1 $см^3$ проводника (концентрацией свободных заряженных частиц в проводнике), сечением проводника и скоростью направленного движения частиц:

$$I = e \cdot n \cdot s \cdot v,$$

где I — ток, e — заряд частицы, n — число свободных заряженных частиц в 1 $см^3$, s — площадь поперечного сечения проводника и v — скорость направленного движения заряженных частиц.

28. Электрический ток в металлах. В проводниках, как мы знаем (§ 11), имеются свободные электрические заряды. Носителями этих зарядов являются различные частицы. В металлах, например, носителями свободных зарядов являются электроны. Металлы в твёрдом состоянии, как известно, обладают вполне определённой кристаллической структурой. Поэтому всякий металл надо рассматривать как пространственную кристаллическую решётку, в узлах которой расположены положительно заряженные атомы данного элемента (ионы). В пространстве же между этими ионами находятся свободные, т. е. не связанные со своими атомами, электроны. Совокупность таких электронов называют

«электронным газом» (рис. 39). Отрицательный заряд свободных электронов по абсолютной величине равен положительному заряду решётки, поэтому в обычных условиях металл электрически нейтрален.

Тепловое движение ионов в пространственной решётке в обычных условиях температуры и давления сводится лишь к более или менее интенсивным колебаниям около положений равновесия, но общий порядок в расположении ионов сохраняется.

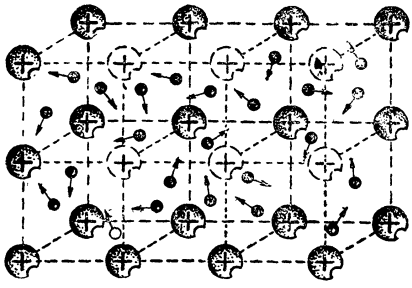


Рис. 39. Модель строения металла.

В отсутствие электрического поля свободные электроны в металле находятся в беспорядочном движении; причём их скорости, как и скорости молекул, зависят от температуры металла. Вследствие беспорядочного характера движения электронов переноса электрического заряда в каком-либо преимущественном направлении не получается. Но если внутри металла создать электрическое поле, приложив к концам куска металла напряжение, то под влиянием сил электрического поля все свободные электроны получат ускорение в определённом направлении. В их беспорядочном движении появится преимущественное направление движения, которое и обусловит ток в металле. Поддерживая постоянное напряжение на концах проводника, мы получим постоянное передвижение электронов в определённом направлении, т. е. постоянный ток.

Нельзя ли непосредственно на опыте проверить, что электрический ток в металле представляет собой поток электронов?

Идея одного такого опыта заключается в следующем. Если начать вращать кусок металла, то увлечённый кристаллической решёткой электронный газ будет вместе с ним вращаться (как жидкость во вращающемся сосуде). При внезапной остановке куска металла электронный газ должен некоторое время продолжать движение по инерции, подобно тому как продолжает ещё вращаться жидкость в сосуде после его остановки. Задача заключалась в том, чтобы найти способ обнаружить это инерционное движение электронного газа в металле. Она была решена следующим образом.

Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси (рис. 40). Концы проволоки посредством гибких проводников соединялись с чувствительным гальванометром. При резком торможении катушки в течение долей секунды гальванометр обнаруживал ток. На-

правление этого тока показывало, что он вызван движением отрицательно заряженных частичек, т. е. электронов.

С помощью такого метода было не только обнаружено существование свободных электронов, но оказалось возможным определить и массу электрона.

Итак, ***электрический ток в металлах представляет собой направленное движение электронов.***

С увеличением напряжения между двумя какими-нибудь точками проводника возрастает скорость направленного движения электронов, а это приводит к увеличению тока в нём.

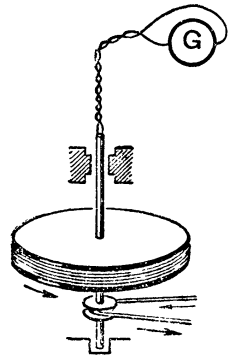


Рис. 40. Опыт, обнаруживающий наличие свободных электронов в металле.

29. Скорость движения электронов внутри металла и работа выхода. Скорость движения электронов внутри металла под действием электрического поля зависит от напряжённости поля. При напряжённости поля, например, в 1 $\frac{в}{см}$ эта скорость невелика — порядка 0,5 $\frac{мм}{сек}$. Скорость же распространения электрического поля внутри проводника огромна, она порядка скорости света $\left(300\,000\,\frac{км}{сек}\right)$. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости распространения электрического тока.

Нечто аналогичное мы имеем в явлении движения газа в газопроводах.

Например, когда в саратовском конце газопровода Саратов — Москва, наполненного газом, поднимается давление, то оно со скоростью звука в газе $\left(\text{около } 500\,\frac{м}{сек}\right)$ распространяется по трубам и быстро передаётся к Москве. С этого момента саратовский газ начинает поступать в Москву. Но газ, находящийся в данный момент в Саратове, попадёт в Москву позже, так как скорость его движения по трубам значительно меньше скорости передачи давления, т. е. скорости звука в газе.

Свободные электроны внутри металла обладают большими энергиями, а потому, когда их скорости направлены к поверхности металла, они, казалось, могли бы вылетать наружу. Между тем самопроизвольное испускание электронов металлом при обычных температурах не наблюдается. Существуют, следовательно, силы, связывающие свободные электроны со всем куском металла, и необходимо поэтому совершать некоторую работу для удаления электронов из металла.

Какова природа сил, удерживающих свободные электроны внутри металла?

Дело в том, что электроны, вылетающие за наружную границу металла, испытывают интенсивное притяжение со стороны ближайших положительных ионов решётки и под действием этого притяжения возвращаются назад, внутрь металла. Наружная поверхность металла оказывается окружённой весьма плотной «электронной атмосферой», образованной непрерывно вылетающими и возвращающимися назад электронами.

Для удаления электрона из металла необходимо совершить некоторую работу по преодолению сил, втягивающих электрон в металл. Величина этой работы носит название р а б о т ы в ы х о д а.

Энергия, необходимая для совершения работы выхода, может быть сообщена электронам различными способами: нагреванием металла, действием на него света, бомбардировкой металла атомами или положительными ионами и др.

30. Электрический ток в вакууме. Наилучшим изолятором является вакуум, т. е. пространство, из которого выкачан воздух.

Но и в вакууме можно получить электрический ток, для чего необходимо внести в него носители зарядов.

На рисунке 41 изображён сосуд, из которого откачан воздух. В этот сосуд впаяны две металлические пластины—два электрода. Один из них *А* (анод) соединим с положительным полюсом источника тока, другой *К* (катод) — с отрицательным. Напряжение между анодом и катодом достаточно приложить 80—100 *в*.

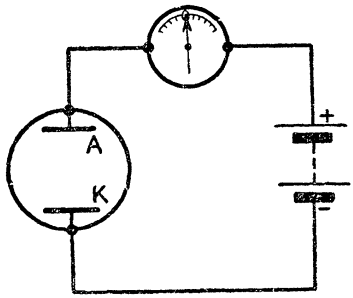


Рис. 41. Опыт, показывающий, что в отсутствие переносчиков зарядов ток в цепи отсутствует.

Включим в цепь чувствительный миллиамперметр. Прибор не показывает никакого тока (рис. 41); это указывает на то, что в вакууме нет никаких свободных носителей зарядов.

Видоизменим опыт. В качестве катода впаяем в сосуд проволочку — нить, концы которой выведем наружу. Эта нить по-прежнему останется катодом. С помощью другого источника тока накалим её (рис. 42). Мы заметим, что, как только нить накаляется, прибор, включённый в цепь, показывает ток, и тем больший, чем сильнее накалена нить. Значит, накалённая

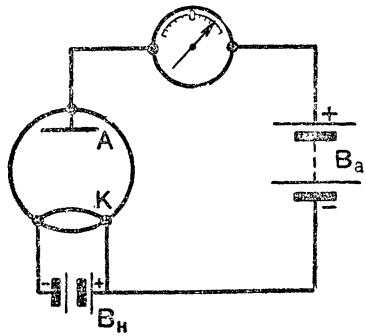


Рис. 42. Вылетающие из раскалённой нити электроны обусловливают появление тока в цепи.

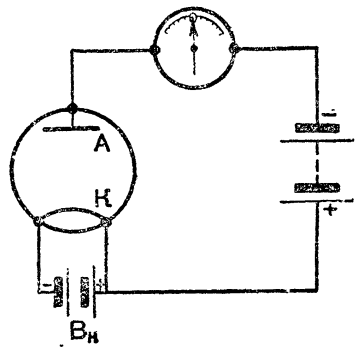


Рис. 42а. Накалённая нить сделана анодом — тока в цепи нет.

нить обеспечивает наличие в вакууме необходимых для существования тока носителей заряда — заряженных частиц, она является их источником.

Как заряжены эти частицы? Ответ на этот вопрос может дать опыт. Переменим полюсы у впаянных в сосуд электродов — нить сделаем анодом, а противоположный полюс — катодом. И хотя нить по-прежнему накалена и по-прежнему посылает в вакуум заряженные частицы, тока в цепи нет (рис. 42а).

Из этого опыта следует, что испускаемые накалённой нитью частицы заряжены отрицательно, так как они отталкиваются от электрода *A*, когда он заряжен отрицательно.

Что представляют собой эти частицы?

Согласно электронной теории, свободные электроны в металле находятся в хаотическом движении. При накале нити это движение усиливается. При этом некоторые электроны, приобретая энергию, достаточную для совершения работы выхода, вылетают из нити, образуя около неё «электронное облачко». Когда между нитью и анодом образуется электрическое поле, то электроны летят к электроду *A*, если он присоединён к положительному полюсу батареи, и отталкиваются обратно к нити, если он присоединён к отрицательному полюсу, т. е. имеет заряд, одноимённый с электронами.

Итак, ***ток в вакууме представляет собой направленный поток электронов.***

31. Природа электрического тока в электролитах. Иной характер, чем в металлах, имеет электрический ток в жидких проводниках — растворах солей, кислот и щелочей, в так называемых электролитах.

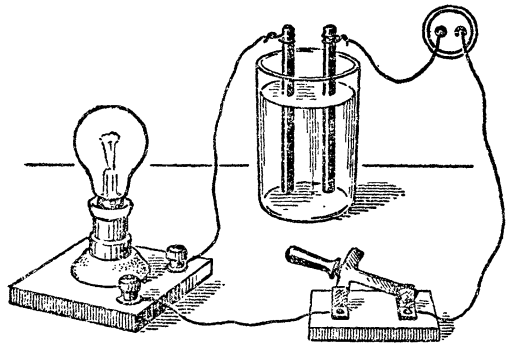


Рис. 43. Установка для обнаружения электропроводности жидкостей.

Обратимся к опыту. Нальём в сосуд дистиллированной воды, опустим в неё два чистых угольных электрода и, соединив их последовательно с электрической лампочкой, включим всю нашу установку в сеть тока (рис. 43). Лампочка не горит; значит, тока в цепи нет. Дистиллированная вода является изолятором, в ней отсутствуют свободные носители зарядов. Изменим несколько наш опыт. Введём пипеткой несколько капель серной кислоты, перемешивая их в воде.

Лампочка загорится, что свидетельствует о появлении тока. В полученном растворе появились носители зарядов. Что собой они представляют? Для выяснения этого продолжим наши опыты.

Нальём в сосуд раствор медного купороса и погрузим в него два угольных электрода, соединив их с полюсами источника постоянного тока. Через некоторое время обнаружим, что на катоде выделилась из раствора чистая медь. Это даёт нам основание сделать заключение, что ток в электролитах обусловлен движением заряженных молекул или атомов вещества. Они называются ионами[1].

[1] Ион — от греческого слова ион — идущий.

Каким же образом в электролите получаются ионы? Ответ на этот вопрос даёт теория электролитической диссоциации.

Согласно этой теории, молекулы солей, щелочей и кислот состоят из двух частей, обладающих противоположными и равными по величине зарядами, т. е. из двух ионов. Силы притяжения между этими ионами обеспечивают целостность молекулы. Когда же эти молекулы находятся в окружении молекул воды (диэлектрическая постоянная которой очень велика: $\varepsilon = 81$), то связи между ионами, образующими молекулу, сильно ослаблены. При таких условиях столкновение между молекулами, вследствие теплового движения их, вызовет распад молекул на ионы, т. е. диссоциацию молекул.

Положительные ионы представляют собой атомы или молекулы, потерявшие один или несколько электронов; отрицательные же ионы — атомы или молекулы, имеющие один или несколько лишних электронов.

Диссоциация каждого вещества происходит вполне определённым образом. Так, например, при растворении соляной кислоты в воде молекулы соляной кислоты HCl распадаются на два иона: ион водорода H^+, заряженный положительно, и ион хлора Cl^-, заряженный отрицательно. Иногда ионами в растворе являются не отдельные атомы, а целые группы атомов, несущие заряды.

В электролитах наряду с процессом диссоциации протекает обратный процесс воссоединения ионов в нейтральные молекулы. Этот процесс называется м о л и з а ц и е й. В результате одновременного протекания обоих процессов — диссоциации и молизации — в растворе устанавливается подвижное равновесие между числом вновь образующихся ионов и числом ионов, воссоединяющихся в молекулы. При наступлении подвижного равновесия число ионов в 1 $см^3$ электролита будет сохраняться постоянным.

Опыт показывает, что ионы металлов и водорода всегда заряжены положительно, а ионы неметаллов — кислотных радикалов и группы OH — заряжены отрицательно.

Схематически распад молекулы на ионы можно представить так:

$$HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$$

$$CaCl_2 \rightarrow Ca^{++} + Cl^- + Cl^-$$

$$H_2SO_4 \rightarrow H^+ + H^+ + SO_4^{--}$$

$$CuSO_4 \rightarrow Cu^{++} + SO_4^{--}.$$

Знаки ($^-$или$^+$) указывают знак заряда иона. Число знаков указывает число зарядов иона, если заряд одновалентного иона принят за единицу.

Ионы в электролите, как и молекулы, движутся хаотически, но когда мы создаём в электролите электрическое поле, приложив напряжение к электродам, то, кроме хаотического, теплового движения, в электролите возникает направленное движе-

ние ионов. Положительные ионы направляются к катоду, а отрицательные — к аноду. Дойдя до соответствующих электродов ионы отдают им свои заряды и, став обычными атомами или молекулами, выделяются на электродах или вступают в химические реакции. Движение ионов в растворе $CuSO_4$ схематически изображено на рисунке 44. Положительные ионы меди изображены выщербленными чёрными шариками, как потерявшие электроны, а ионы SO_4— с дополнительными шариками, как получившие добавочные электроны.

В зависимости от природы электролита и материала анода и катода могут быть более или менее сложные химические взаимодействия на аноде и катоде, но суть дела заключается именно в переносе ионами электрического заряда.

Итак, ***электрический ток в электролитах представляет собой направленное движение ионов.***

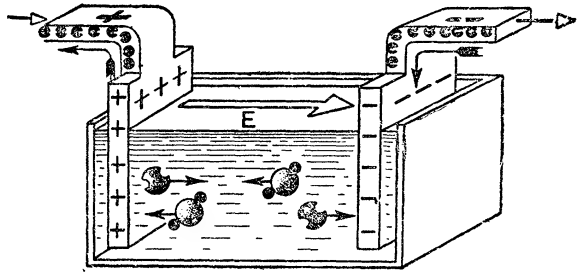


Рис. 44. Схема движения ионов в растворе медного купороса.

Чем больше ионов обоих знаков содержится в 1 $см^3$ электролита и чем больше скорость их движения, тем больше будет ток.

Скорость движения иона в электролите под действием поля зависит от его массы, размеров, температуры, раствора и напряжённости поля. Эти скорости вообще невелики. Самый быстрый из всех ионов — ион водорода, например, проходит в час путь, равный 11,7 *см*, при напряжённости поля 1 $\frac{в}{см}$. Скорость же распространения электрического поля в электролите, как и в металле, близка к 300 000 $\frac{км}{сек}$.

32. Природа электрического тока в газах. Рассмотрим теперь, какова природа электрического тока в газах. Обратимся опять к опыту. Возьмём конденсатор и зарядим его, создав между его пластинами напряжение. Электрометр, приключённый к пластинам конденсатора, всё время показывает одно и то же напряжение; значит, воздух в обычных условиях является изолятором, т. е. не содержит свободных заряженных частиц.

Внесём зажжённую спиртовку или спичку в пространство между пластинами конденсатора (рис. 45). Мы заметим, что напряжение, существующее между ними, уменьшается, конденсатор разряжается, следовательно, между пластинами возникает электрический ток. Всё это указывает на то, что в воздухе между пластинами под действием пламени появились заряженные частицы. Что же они представляют собой?

Вполне естественно предположить, что такими заряженными частицами являются молекулы воздуха, которые под влиянием пламени получили электрические заряды и, превратившись в ионы, стали двигаться в электрическом поле между пластинами, создавая, таким образом, электрический ток, приведший к уменьшению напряжения на пластинах конденсатора.

Путём тщательных исследований было установлено, что носителями электрических зарядов в газах являются ионы и электроны, которые возникают в газе в результате воздействия на него ионизатора.

Ионизаторами являются пламя, рентгеновы лучи, лучи, испускаемые радиоактивными веществами. Любой ионизатор, какого бы происхождения он ни был, обладает определённой ионизационной способностью, т. е. способностью создавать в данном объёме за какое-нибудь время определённое количество положительных и отрицательных ионов.

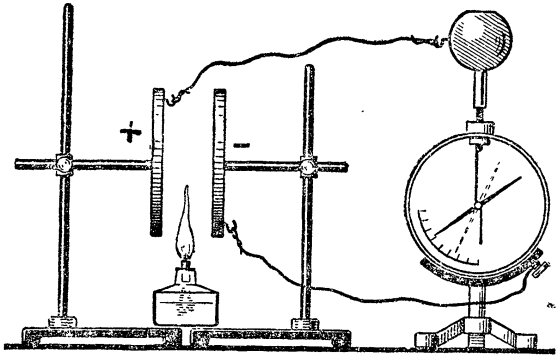


Рис. 45. Пламя делает воздух проводником тока.

Под действием ионизатора молекулы газа теряют электроны и становятся положительно заряженными ионами. Освободившиеся электроны, во-первых, сами становятся носителями электрических зарядов, а, во-вторых, присоединяясь к нейтральным молекулам или атомам, образуют отрицательно заряженные ионы. Таким образом, в газе могут возникать свободные заряды в виде электронов и ионов обоих знаков.

Заряженное тело, находясь в ионизированном газе, притягивает к себе свободные заряды противоположного знака, которые и нейтрализуют заряды на теле, вследствие чего это тело разряжается.

В газах не происходит выделения их составных частей на электродах, как это имеет место в электролитах, так как при ионизации газа молекулы его не распадаются; они лишь теряют или же присоединяют к себе электроны.

Газовые ионы, подойдя к электроду, отдают ему свои заряды, превращаются в нейтральные молекулы или атомы и диффундируют обратно в газ. В электролитах же ионы, подошедшие к электродам, или отлагаются на поверхностях электродов, или вступают в химические реакции.

Если ионы и свободные электроны, образовавшиеся в газе, оказываются в электрическом поле, то они приобретают направленное движение.

Направленное движение положительных ионов к катоду, а отрицательных ионов и электронов к аноду представляет собой электрический ток в газе.

Таким образом, полный ток в газе складывается из двух потоков заряженных частиц: потока, идущего к аноду, и потока, идущего к катоду.

33. Электродвижущая сила источника тока. Мы видели, что, для того чтобы получить в проводнике ток, нужно возбудить и непрерывно поддерживать внутри проводника электрическое поле. Эту задачу выполняет включаемый в цепь источник тока.

Во всяком источнике тока происходит разделение положительных и отрицательных зарядов. Результатом работы, совершаемой при этом разделении, является превращение того или другого вида энергии, в зависимости от рода источника тока, в электрическую энергию. Например, в гальваническом элементе химическая энергия взаимодействия веществ превращается в электрическую энергию. В результате разделения зарядов происходит накопление их на полюсах источника и возникновение вследствие этого на полюсах разности потенциалов. Возникшее при этом электрическое поле внутри источника тока противодействует разделению зарядов. Если цепь разомкнуть, то при достижении на полюсах источника определённой разности потенциалов разделение зарядов прекращается. Вместе с этим прекращается и работа источника тока. Соединяя полюсы источника тока (рис. 37в) проводником, который будет представлять собой внешний участок цепи, мы создадим в нём электрическое поле, которое будет действовать на электрические заряды проводника. Электрические заряды во внешней цепи (электроны в металле) придут в движение, что и обусловит ток. Избыточные заряды отрицательного полюса источника начнут стекать во внешний участок цепи, на положительном же полюсе будет происходить нейтрализация его положительного заряда. Таким образом, на обоих полюсах источника тока избыточный заряд уменьшится. Это приведёт к тому, что в источнике снова начнёт происходить разделение зарядов и оно будет продолжаться всё время, пока цепь тока остаётся замкнутой. Во внешнем участке цепи будет совершаться работа силами электрического поля, внутри источника тока работа будет совершаться силами, развиваемыми источником тока. Обе эти работы равны по величине.

Величина, измеряемая отношением работы, совершаемой источником тока при перемещении заряда по замкнутой цепи, к величине заряда, называется электродвижущей силой (э. д. с.) источника.

$$E=\frac{A}{q}.$$

Электродвижущая сила равна разности потенциалов полюсов источника при разомкнутой цепи.

34. Гальванический элемент. В основу устройства гальванического элемента легло явление взаимодействия металла с электролитом, приводящее к возникновению в замкнутой цепи электрического тока. Явление это было открыто в конце XVIII в. итальянским учёным Гальвани, в честь которого новые источники тока были названы гальваническими элементами. Гальванические элементы в основном состоят из двух химически различных электродов, опущенных в тот или иной электролит.

Рассмотрим процессы, происходящие при работе гальванического элемента Вольта.

Опустим в раствор серной кислоты цинковый электрод. Взаимодействуя с серной кислотой, цинковый электрод отдаёт в раствор положительные ионы цинка, а сам при этом заряжается отрицательно. В растворе же образуется избыток положительных ионов водорода. Между цинком и раствором возникает определённой величины разность потенциалов, при которой дальнейшее растворение цинка прекращается, так как положительные ионы цинка уже не смогут выходить из электрода в положительно заряженный раствор [1].

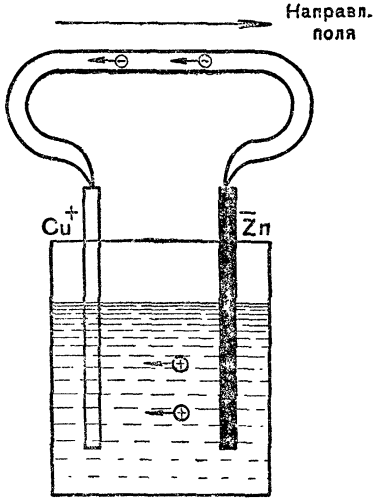


Рис. 46 Схема движения заряженных частиц в цепи элемента Вольта.

Величина возникшей разности потенциалов не зависит от размеров погружённой части электрода, так как указанное выше равновесие устанавливается у каждого участка по поверхности электрода, соприкасающейся с раствором.

Чтобы обнаружить и использовать эту разность потенциалов, необходимо в этот же раствор погрузить второй электрод. Однако если второй электрод будет также из цинка, то оба они будут находиться в растворе в совершенно одинаковых условиях и между ними не будет никакой разности потенциалов. Если же в качестве второго электрода взять медную пластинку, которая очень мало растворяется в растворе серной кислоты, то между цинковым и медным электродами возникает разность потенциалов порядка 1,1 *в*.

Если теперь соединить металлическим проводником цинковый электрод с медным, то вследствие наличия разности потенциалов между ними свободные электроны в проводнике будут

[1] Тепловое движение ионов в растворе усложняет описанные выше явления внутри элемента. Равновесие, которое наступает между электродом и раствором при некоторой разности потенциалов, является не статическим, а динамическим (подвижным). Сколько ионов в некоторый промежуток времени переходит из электрода в раствор, столько же их вновь осаждается на электроде.

двигаться от цинка к меди. В результате медь приобретёт излишек электронов, а цинк потеряет часть электронов. Вследствие этого цинк станет менее отрицательным по отношению к раствору, а медь — менее положительной. Равновесие между электродами и раствором нарушится. Новые положительные ионы цинка станут переходить в раствор, а в цинке появятся вновь освобождённые электроны вместо ушедших к меди. На медном же электроде будут осаждаться новые положительные ионы водорода и своими зарядами нейтрализовать приходящий с цинка отрицательный заряд электронов.

Таким образом, при работе элемента в процессе растворения цинка происходит разделение зарядов. При превращении энергии химического взаимодействия веществ в электрическую совершается работа.

Вольта Алессандро (1745—1827) — выдающийся итальянский физик. Он открыл явление возникновения электрических зарядов при соприкосновении разных металлов и создал первый источник постоянного тока —«вольтов столб», чем положил начало развитию электродинамики. Кроме того, Вольта принадлежит ряд открытий в области электростатики. Именем Вольта названа единица измерения электрического напряжения — *вольт*.

Итак, в замкнутой цепи, состоящей из элемента и проводников, будет идти электрический ток. Во внешней части цепи он представляет собой движение электронов под действием электрического поля от цинка к меди, во внутренней же части цепи (в растворе) — движение ионов. Схема движения заряженных частиц в такой цепи изображена на рисунке 46.

Зажимы элемента, к которым приключают провода от внешней цепи, называются полюсами элемента. Полюс, имеющий положительный потенциал (в элементе Вольта медный электрод), называется положительным полюсом источника тока, другой полюс — отрицательным.

Э. д. с. элемента Вольта 1,1 *в*.

35. Поляризация элемента. Элемент Лекланше. В работе описанного выше элемента Вольта имеется существенный недостаток. Он заключается в том, что атомы водорода, отлагающиеся на медном электроде, вскоре после начала работы элемента обволакивают электрод и прекращают к нему доступ новых ионов водорода (рис. 47). Вследствие этого разность потенциалов на полюсах элемента резко падает. Такое явление называется поляризацией элемента. Борьба с этим нежелательным явлением проста; достаточно ввести в элемент какой-нибудь окислитель, и он будет отдавать свой кислород на соединение с водородом, образуя воду; анод же будет оставаться чистым,

и элемент будет работать нормально. Такие окислители, вводимые в элемент, носят название деполяризаторов. В качестве деполяризаторов часто употребляют перекись марганца, двухромовокислый калий и др.

Существует большое число различных типов неполяризующихся гальванических элементов, но принцип действия их один и тот же.

Наиболее распространённым в лабораторной практике является элемент Лекланше (рис. 48). В нём отрицательным полюсом служит цинк Zn, а положительным — уголь (кокс) С. Оба электрода находятся в растворе нашатыря NH_4Cl, деполяризатором является перекись марганца MnO_2, которая в мешочке *F* охватывает угольный стержень. При работе элемента в нём происходит химическая реакция. Продуктами реакции являются хлористый цинк $ZnCl_2$, аммиак NH_3 и водород H_2. Последний взаимодействует с перекисью марганца, но довольно медленно, поэтому при продолжительной работе элемент всё же поляризуется. Э. д. с. элемента Лекланше 1,4 *в*.

36. Аккумулятор. 1. Принцип работы аккумулятора. При работе гальванических элементов расходуются электроды и раствор, поэтому по истечении некоторого времени их приходится заменять новыми. Химические

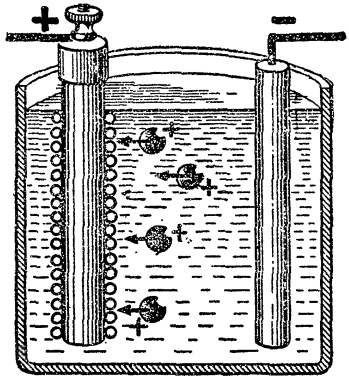


Рис. 47. Поляризация элемента.

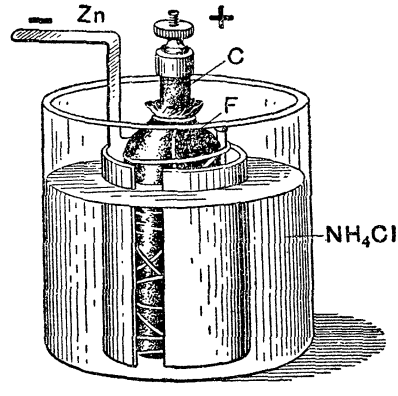


Рис. 48. Элемент Лекланше.

процессы в гальванических элементах необратимы. Существуют источники тока, работающие на принципе обратимости химических процессов. Такими источниками тока являются аккумуляторы. Познакомимся с принципом работы аккумуляторов.

Нальём в стакан раствор серной кислоты и опустим туда два одинаковых свинцовых электрода, поверхности которых обычно покрыты окисью свинца. Включим наш прибор в цепь источника тока, как показано на рисунке 49.

Повернув переключатель *k* в положение *a*, пропускаем некоторое время ток через раствор. Поставим теперь рукоятку переключателя в положение *b*. Этим мы выключаем источник тока и замыкаем наш прибор на гальванометр. Мы заметим, что стрелка гальванометра отклоняется. Наш прибор теперь сам стал источником тока. Ток этот довольно скоро прекращается, и если мы хотим вновь получить его, нам нужно снова пропустить через раствор электрический ток, или, как говорят, произвести зарядку прибора.

Описанный выше прибор представляет собой простейший свинцовый аккумулятор, т. е. прибор, который при зарядке накапливает химическую энергию и может затем служить источником постоянного тока.

Работа аккумулятора основана на явлении поляризации электродов при электролизе.

На пластинке, соединённой с отрицательным полюсом батареи — катоде, при пропускании тока через аккумулятор из раствора серной кислоты выделяется водород, который восстанавливает окись свинца в чистый свинец. На

аноде же аккумулятора выделяется кислород, который окисляет окись свинца в перекись свинца. Между анодом и катодом возникает разность потенциалов. Аккумулятор будет заряжен, когда катод окажется чистым свинцом, а анод — перекисью свинца.

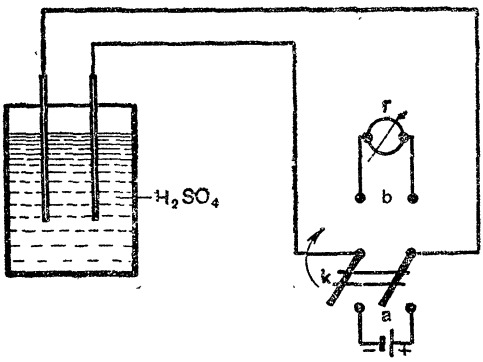


Рис. 49. Схема установки для демонстрации принципа работы аккумулятора.

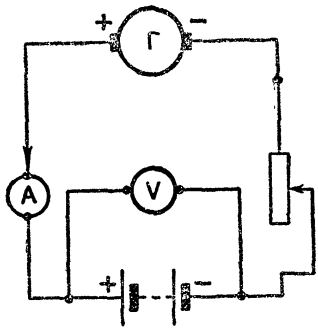


Рис. 50. Схема включения приборов при зарядке аккумулятора.

При зарядке ток направлен внутри аккумулятора от анода к катоду. На рисунке 50 изображена схема включения приборов при зарядке аккумулятора током, получаемым при помощи генератора *Г*.

Соединяя пластины аккумулятора проводником, мы получаем ток. Направление тока при разрядке аккумулятора противоположно направлению тока при зарядке, а именно: во внешней цепи ток направлен от перекиси свинца к свинцу, во внутренней — от свинца к перекиси свинца. Положительные ионы водорода при разрядке будут двигаться к перекиси свинца, а отрицательные ионы кислорода — к свинцу.

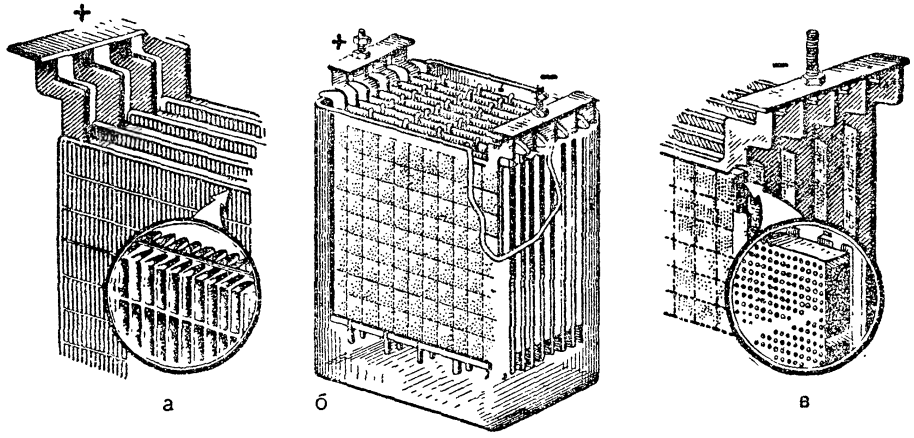


Рис. 51—52. Внутреннее устройство кислотного аккумулятора.

Положительная пластина будет восстанавливаться водородом, а отрицательная пластина будет окисляться кислородом.

Как только обе пластины станут одинаковыми, аккумулятор перестанет давать ток. Его снова надо зарядить. При новой зарядке положительная пластина будет окисляться в перекись свинца, отрицательная — восстанавливаться в чистый свинец и т. д.

Каждый аккумулятор характеризуется ёмкостью [1]. Ёмкость аккумулятора измеряется величиной заряда, который может дать заряженный аккумулятор при разрядке. Ёмкость аккумулятора выражают не в кулонах, а в особых единицах, называемых ампер-часами. Ампер-час — это электрический заряд, доставляемый током в 1 ампер в течение одного часа.

1 ампер-час равен 3600 кулонам.

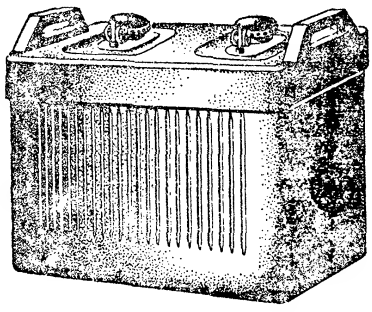


Рис. 53. Внешний вид кислотного аккумулятора.

2. Устройство кислотного аккумулятора. Мы описали действие простейшего аккумулятора; ёмкость такого аккумулятора очень мала. Для увеличения ёмкости аккумулятора положительные (анодные) и отрицательные (катодные) пластины его изготовляются в виде решётчатых свинцовых пластин, покрытых активной массой (PbO_2 и губчатым свинцом).

Положительные пластины (рис. 51—52, *а*) состоят из целого ряда скреплённых между собой параллельных вертикальных свинцовых рёбер для увеличения поверхности. С помощью особой электролитической обработки поверхностный слой рёбер превращается в перекись свинца. Положительные пластины имеют бурый цвет. Отрицательные пластины (рис. 51—52, *в*) имеют остов в виде свинцовой решётки, ячейки которой заполняются окисью свинца PbO (свинцовый глёт), защищённый от выпадения покрывающими решётку с обеих сторон свинцовыми листами с большим количеством мелких отверстий, служащих для доступа раствора к свинцу. При первой зарядке окись свинца восстанавливается ионами водорода в чистый

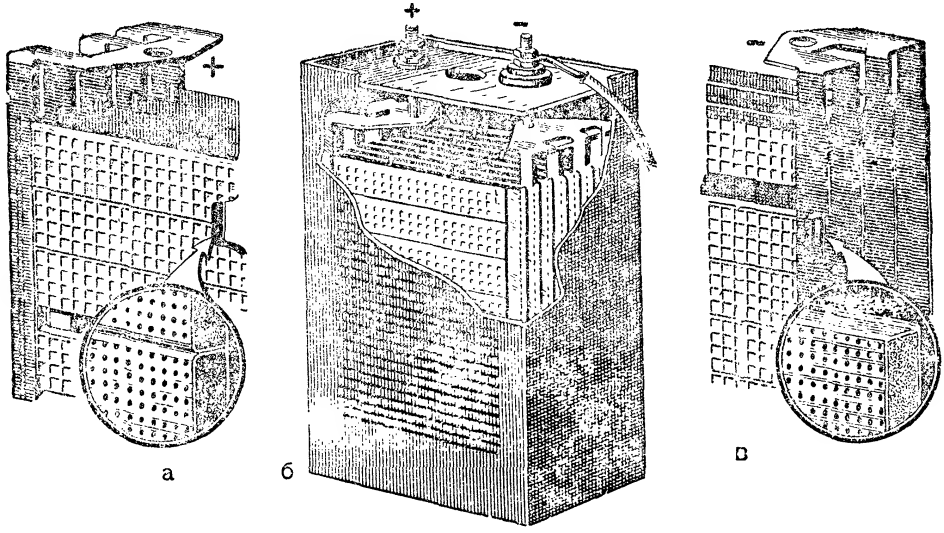


Рис. 54. Внутреннее устройство щелочного аккумулятора.

свинец, имеющий пористую структуру и называемый поэтому губчатым свинцом. Отрицательные пластины имеют серый цвет. На рисунке 52—52, *б* изображено соединение пластин аккумулятора.

Для каждого аккумулятора существуют предельные зарядные и разрядные токи, указываемые в прилагаемом к аккумулятору паспорте.

[1] Не следует смешивать с понятием электроёмкости проводника (глава I, § 20).

Э. д. с. кислотного аккумулятора сразу по прекращении зарядки около 2,7 *в*. В начале работы аккумулятора она быстро падает до 2,1 *в*, затем медленно падает до 1,8 *в*, после этого разрядку аккумулятора прекращают и ставят его снова на зарядку.

На рисунке 53 изображён внешний вид кислотного аккумулятора.

3. Устройство щелочного аккумулятора. В настоящее время широкое распространение получили щелочные аккумуляторы. В этих аккумуляторах электролитом служит 20-процентный водный раствор щёлочи (KOH). Пластины этих аккумуляторов состоят из стальных решёток с карманами (рис. 54). У положительных пластин эти карманы заполняются массой из гидрата окиси никеля [$Ni(OH)_3$] (рис. 54, *а*); у отрицательных — из губчатого кадмия (рис. 54, *в*); пластины помещаются в стальной сосуд со стальной приваренной крышкой. Эти аккумуляторы дают меньшую э. д. с. по сравнению с э. д. с. свинцовых аккумуляторов. При разряде э. д. с. падает с 1,4 *в* сначала быстро до 1,3 *в*, а затем медленно до 1,15 *в*, при которой и следует прекращать разряд. Щелочные аккумуляторы имеют бо́льшую механическую прочность, чем свинцовые, и являются менее требовательными к уходу. На рисунке 54, *б* изображено соединение пластин внутри щелочного аккумулятора.

Аккумуляторы находят самое разнообразное и широкое применение. Так, например, батареи аккумуляторов питают током двигатели подводных лодок во время их подводного плавания. Аккумуляторы используются в автомобиле для освещения на стоянке, для пуска автомобильного двигателя; широкое применение аккумуляторы находят в различных лабораторных измерениях.

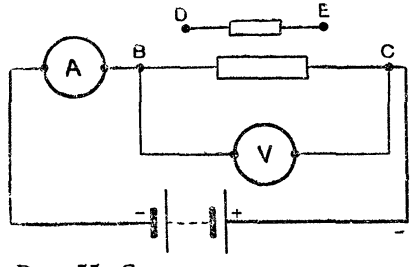


Рис. 55. Схема опыта для проверки закона Ома для участка цепи.

37. Закон Ома для участка цепи. Различные действия электрического тока, такие, как нагревание проводника, магнитные и химические действия, меняются при изменении тока. Регулировать эти действия можно только изменяя ток. Но для того чтобы получить возможность управлять током в цепи, нужно знать, от чего и как он зависит.

Будем пропускать ток через проводник *BC* (рис. 55), измеряя амперметром *A* ток в проводнике и вольтметром *V* напряжение на концах проводника.

Меняя источники тока, включённые в цепь, мы заметим, что изменяется и ток в цепи и напряжение на концах проводника. При этом во сколько раз увеличивается напряжение на концах данного проводника, во столько же раз увеличивается и ток в нём.

Если взять другой проводник *DE* и повторить с ним те же самые опыты, то мы увидим, что ток и в этом проводнике строго пропорционален напряжению на концах проводника.

Обозначая напряжение на концах проводника через U, а ток через I, можно зависимость тока от напряжения выразить следующей формулой:

$$I = kU. \qquad (1)$$

В этой формуле величина k зависит от свойств проводника: чем больше k, тем больше и ток в проводнике при одном и том же

напряжении. Для данного проводника при всех значениях тока и напряжения величина k остаётся постоянной, равной отношению тока к напряжению: $k=\frac{I}{U}$ (если при этом температура проводника не меняется). Поэтому величина k характеризует свойство данного проводника и носит название электропроводности или просто проводимости проводника.

Зависимость между током и напряжением, выражаемую формулой (1), можно сформулировать следующим образом:

Ток в проводнике прямо пропорционален проводимости проводника и напряжению на его концах.

Ом Георг (1787—1854) — немецкий физик. Открыл теоретически и подтвердил экспериментально закон, выражающий связь между током в цепи, электродвижущей силой и сопротивлением цепи. Этот закон назван именем Ома.

Графическое изображение зависимости тока от напряжения представляется прямой линией, поэтому принято говорить, что ток в металлических проводниках в зависимости от напряжения изменяется по линейному закону.

Величина, обратная проводимости:

$$\frac{1}{k}=R,$$

называется сопротивлением проводника. Выражая в формуле (1) проводимость k через сопротивление R, получаем:

$$I=\frac{U}{R}.$$

Ток в данном участке цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален его сопротивлению.

Этот закон впервые был открыт в 1827 г. немецким учёным Омом и называется законом Ома.

Несмотря на различную природу тока в металлах и электролитах, зависимость между током и напряжением и в электролитах носит такой же линейный характер. Только в газах зависимость между током и напряжением не выражается законом Ома. Для газов эта зависимость значительно сложнее.

38. Напряжение и падение напряжения. Зная величину напряжения на концах проводника и ток в нём, по закону Ома можно вычислить сопротивление проводника:

$$R=\frac{U}{I}.$$

Практически важное значение имеет следующее выражение, получаемое из закона Ома:

$$U=IR.$$

Напряжение на участке цепи прямо пропорционально сопротивлению этого участка.

Величину IR в электротехнике называют падением напряжения на данном участке цепи.

Следует отметить, что понятия «напряжение» и «падение напряжения» равнозначны лишь в тех случаях, когда результатом работы тока, протекающего по данному участку цепи, является только нагревание проводника.

В случае же, например, разомкнутой цепи на полюсах источника тока существует напряжение, но о падении напряжения говорить нельзя.

39. Единица сопротивления. Полагая в выражении $R=\frac{U}{I}$: $U=1$ ед. напряжения, $I=1$ ед. тока, получим $R=1$ ед. сопротивления.

За единицу сопротивления принимают сопротивление такого проводника, по которому проходит ток в 1 а при напряжении на концах проводника в 1 в. Эта единица сопротивления называется омом.

Для измерения сопротивления проводников необходимо было прежде всего выбрать образец, или, как принято называть, эталон сопротивления.

Международный съезд электриков в Лондоне в 1908 г. постановил принять за единицу сопротивления в 1 *ом* сопротивление столбика ртути длиной 106,3 *см*, имеющего по всей длине постоянное сечение, равное 1 *мм*^{2}, при температуре таяния льда.

Установленный таким образом эталон сопротивления называется международным омом.

При выборе ртути для установления эталона ома исходили главным образом из того, что ртуть легче других веществ можно получить химически чистой, её легко содержать при постоянной температуре и, наконец, ртуть как жидкость свободна от внутренних упругих напряжений.

На практике применяются главным образом проволочные эталоны, состоящие из одной или нескольких катушек, на которых помещены изолированные проволоки, имеющие определённые сопротивления.

При точных измерениях сопротивлений проволочные эталоны тщательно сверяются с нормальным ртутным эталоном.

40. Магазин сопротивлений. Набор образцовых сопротивлений, с которыми можно сравнивать измеряемые сопротивления, называется магазином сопротивлений. На рисунке 56 изображено устройство такого прибора. На верхней доске ящи-

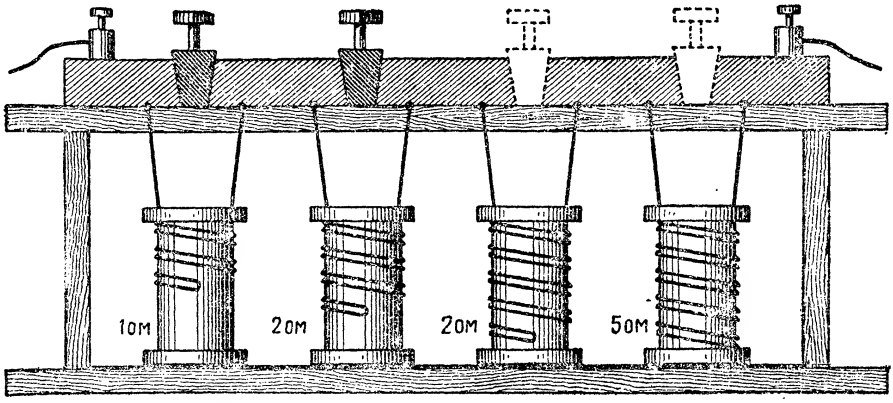


Рис. 56. Магазин сопротивлений.

ка имеется группа металлических пластин, которые можно соединять друг с другом вставляемыми между ними штырями.

Внутри ящика помещены катушки проволок, концы которых подведены к пластинам. Как видно из рисунка, пластины соединены друг с другом катушками с определёнными сопротивлениями.

Если прибор включён в цепь крайними клеммами и штыри между пластинами вынуты, то ток идёт последовательно через все катушки. Когда между пластинами вставлены штыри, то почти весь ток идёт по толстым медным пластинам и штырям и лишь ничтожная доля тока, которой можно пренебречь, ответвляется в катушки. Вынимая тот или иной штырь или группу штырей, мы можем при помощи магазина получить различные сопротивления в зависимости от величины сопротивления катушек, имеющихся в магазине.

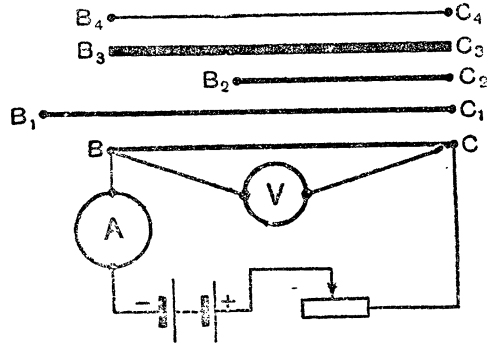


Рис. 57. Схема опыта для изучения зависимости сопротивления проводника от его размеров и материала.

41. Зависимость сопротивления проводника от его размеров и материала. Присоединяя к одному и тому же источнику тока проводники из различных материалов, различной длины и толщины, мы замечаем, что по цепи идут неодинаковые токи. Разные проводники обладают различным сопротивлением.

Включим в цепь источника тока какой-нибудь проводник BC и измерим амперметром A ток в цепи (рис. 57). Заменяя этот проводник другим, более длинным проводником B_1C_1 из того же самого материала и того же самого сечения, мы замечаем, что ток становится слабее. Если взять проводник B_2C_2 более короткий, то ток становится сильнее.

Точно так же при одной и той же длине проводника ток становится сильнее, если взять более толстую проволоку B_3C_3 из того же материала; при уменьшении поперечного сечения проволоки B_4C_4 ток становится слабее.

Таким образом, сопротивление проводника зависит от его размеров. Величина этого сопротивления определяется на опыте по показаниям амперметра и вольтметра.

Если взять две совершенно одинаковые по размерам проволоки: одну железную, а другую медную, то мы увидим, что при одном и том же источнике тока по железной проволоке идёт значительно меньший ток, чем по медной. Следовательно, проводники одинаковых размеров, но изготовленные из различных материалов, обладают неодинаковым сопротивлением.

На основании опытов было установлено, что:

сопротивление проводника прямо пропорционально его длине, обратно пропорционально площади поперечного сечения и зависит от вещества, из которого состоит проводник. Сопротивление проводника зависит также от его температуры.

Если сопротивление проводника при определённой температуре обозначить буквой R, то можно написать:

$$R=\rho\frac{l}{S}, \qquad (1)$$

где l — длина проводника, S — площадь его поперечного сечения. Величина, обозначенная греческой буквой ρ (ро), характеризует электрические свойства проводника. Эта величина называется удельным сопротивлением проводника. Её численное значение зависит от единиц, в которых измерена длина и сечение проводника.

В технике длину проводника измеряют в метрах, а сечение — в квадратных миллиметрах.

Для проводника длиной 1 *м* с сечением 1 *мм*^{2} получаем из уравнения (1) $\rho=R$. Значит, *удельное сопротивление есть сопротивление проводника из данного вещества длиной 1 м и сечением 1 мм*^{2}.

Если в формуле $R=\rho\frac{l}{S}$ выразить l в метрах, S в квадратных миллиметрах, а R в омах, то ρ получит наименование *ом* $\frac{мм^2}{м}$.

В приводимой ниже таблице указаны удельные сопротивления проводников из некоторых веществ при 20° С.

Наименьшим удельным сопротивлением, как видно из таблицы, обладают химически чистые серебро и медь. Для технических целей применяют чаще всего медь.

На удельное сопротивление металлов большое влияние оказывают примеси. Так, например, примесь у химически чистой меди 0,05% углерода повышает сопротивление меди на 33%; примесь 0,13% фосфора увеличивает сопротивление её на 176%.

Вполне понятно поэтому, какое важное значение в электротехнике имеет химически чистая медь.

Материал проводника	Удельное сопротивление в $ом \frac{мм^2}{м}$
Серебро	0,016
Медь	0,017
Алюминий	0,029
Никелин (сплав) 62%Cu+18%Ni+20%Zn	0,40—0,44
Манганин (сплав) 84%Cu+4%Ni+12%Mn	0,42
Константан (сплав) 60%Cu+40%Ni	0,40—0,51
Нихром (сплав) 57%Ni+16%Cr+26%Fe+1%Mn	1,1
Фехраль (сплав) 80%Fe+14%Cr+6%Al	1,2
Хромель (сплав) 90%Ni+10%Cr	1,3
Уголь для дуговых и калильных ламп	40—50

Металлические сплавы имеют значительно большее удельное сопротивление, чем чистые металлы, из которых состоят эти сплавы.

В настоящее время большое применение в технике находят твёрдые вещества, механизм электрической проводимости у которых иной, чем у металлов, электролитов и газов. Такие вещества называются полупроводниками. Полупроводниками, например, являются: закись меди, селен, сернистый таллий и многие другие вещества. (Подробнее о полупроводниках см. в приложении.)

Упражнение 7.

Исходя из основ электронной теории проводимости металла, объясните зависимость сопротивления проводника от его длины, площади поперечного сечения и материала.

42. Зависимость сопротивления проводника от температуры. Включим последовательно в цепь электрическую лампу и железную проволоку, свёрнутую спиралью. Нагревая спираль на горелке, мы увидим, что свечение лампы становится менее ярким. Если в цепь вместо лампы включить амперметр, то он покажет, что при нагревании железной спирали ток в цепи уменьшается (рис. 58). Отсюда следует, что при нагревании железной проволоки её сопротивление увеличивается.

Заменяя в этом опыте железную проволоку проволоками из любых других металлов, мы увидим, что *при нагревании сопротивление у всех металлов увеличивается.* У чистых металлов изменение сопротивления с температурой значительно, у сплавов меньше. Есть специальные сплавы, у которых сопротивление почти не меняется при повышении температуры; таковы, например, сплавы константан, манганин и др. Проволока, изготовленная из этих сплавов, идёт, например, на устройство эталонов и магазинов сопротивлений, а также на изготовление реостатов.

Иное наблюдается в электролитах. Если в цепь вместо железной проволоки включить какой-нибудь электролит (рис. 59), то

можно заметить, что при нагревании электролита ток в нём всё время увеличивается. Значит, сопротивление электролитов при повышении температуры уменьшается.

Отношение величины изменения сопротивления проводника при его нагревании на 1° С к величине первоначального сопротивления проводника при 0 °С называется температурным коэффициентом сопротивления.

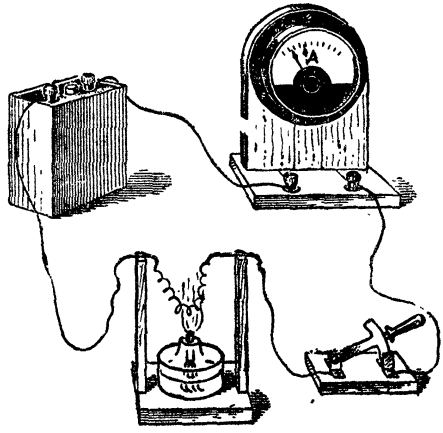


Рис. 58. Установка для изучения зависимости сопротивления металлических проводников от температуры.

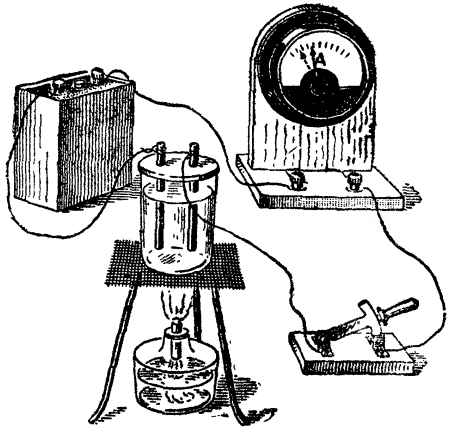


Рис. 59. При нагревании электролита ток в цепи увеличивается.

Если сопротивление проводника при 0° равно R_0, а при температуре t равно R_t, то температурный коэффициент сопротивления α определится из формулы:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}, \text{ отсюда } R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Температурные коэффициенты сопротивлений различных металлических проводников приведены в следующей таблице.

Проводник	$\alpha \frac{1}{град}$	Проводник	$\alpha \frac{1}{град}$	Проводник	$\alpha \frac{1}{град}$
Сталь	0,0050	Никелин	0,0003	Цинк	0,0039
Вольфрам	0,0046	Нихром	0,0003	Свинец	0,0041
Алюминий	0,0042	Константан	0,00005	Платина	0,0025
Серебро	0,0040	Манганин	0,000015	Ртуть	0,0027
Медь	0,0040				

Зависимость сопротивления проводника от температуры используется в устройстве термометров сопротивления — приборов

для измерения температур. В простейшем виде термометр сопротивления представляет собой намотанную на слюдяную пластинку тонкую платиновую проволоку (рис. 60), сопротивление которой определено при различных температурах. Термометр сопротивления помещают внутрь тела (например, в печь), температуру которого желают определить. Измеряя сопротивление проволоки термометра, можно определить температуру тела. Платиновые термометры особенно удобны для измерения как высоких, так и очень низких температур, которые нельзя измерять жидкостными термометрами.

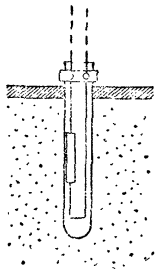


Рис. 60. Термометр сопротивления.

Платиновыми термометрами можно измерять температуру в пределах от —200 до +600° С с точностью до 0,0001° С.

При очень низких температурах у многих металлов наблюдается одно удивительное явление: начиная с некоторой температуры, сопротивление их внезапно, скачком, уменьшается до нуля. Это явление называется сверхпроводимостью.

Температура, при которой металл становится сверхпроводящим, очень низка; например, у ртути она равна 2,4° К, у олова 3,7° К, у свинца 7,2° К.

Упражнение 8.

1. Изобразите графически зависимость тока от напряжения на участке цепи.
2. По никелиновому проводнику длиной 10 *м*, сечением 0,5 *мм*^{2} проходит ток в 1 *а*. Изобразите на графике падение напряжения вдоль проводника, откладывая по горизонтальной оси длину проводника, а по вертикальной напряжение.
3. Вычислить удельное сопротивление круглого провода, диаметр сечения которого 1 *см*, если кусок этого провода длиной 2,5 *м* имеет сопротивление 0,00055 *ом*.
4. Чему равно удельное сопротивление ртути при 0° С?
5. Два куска железной проволоки имеют одинаковый вес, а длина одного из этих кусков в 10 раз больше длины другого. Какой из кусков обладает большим сопротивлением? Во сколько раз?
6. Какой длины потребуется взять константановую проволоку сечением 1 *мм*^{2} для изготовления эталона в 2 *ома*?
7. Эталон сопротивления в 100 *ом* приготовлен из манганиновой проволоки при 15° С. Каково будет сопротивление этого эталона при 5° С?
8. Сколько требуется меди на провод длиной 10 *км*, сопротивление которого должно быть 10 *ом*? Плотность меди $8{,}5\ \frac{г}{см^3}$.

43. Последовательное соединение проводников. Электрические цепи, с которыми приходится иметь дело на практике, обычно состоят не из одного проводника, а из системы различных проводников, которые могут быть соединены между собой по-разному. Зная сопротивление каждого из этих проводников и способ их соединения, можно рассчитать общее их сопротивление.

Рассмотрим простую цепь, составленную из источника тока и двух проводников, соединённых последовательно (рис. 61). Ток во всех частях такой цепи, как мы знаем (§ 27), одинаков. Напряжение же на концах каждого из проводников будет различно.

Пусть I — ток в цепи, R_1 и R_2 — сопротивления проводников, а U_1 и U_2 — напряжения на концах этих проводников, измеряемые вольтметрами V_1 и V_2.

На основании закона Ома можно написать:

$$U_1 = IR_1; \qquad (1)$$

$$U_2 = IR_2. \qquad (2)$$

Разделив равенство (1) на (2), получим:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

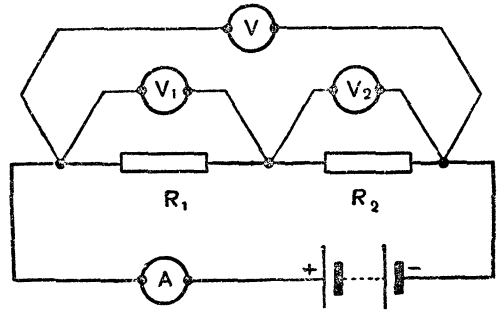


Рис. 61. Последовательное соединение проводников.

При последовательном соединении напряжения на проводниках пропорциональны их сопротивлениям.

Только при таком распределении напряжений и становится возможным один и тот же ток во всех участках цепи.

Полное напряжение U на обоих проводниках, измеряемое вольтметром V, равно сумме напряжений на отдельных проводниках:

$$U = U_1 + U_2;$$

$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2). \qquad (3)$$

Это равенство вытекает из того, что напряжение есть величина, измеряемая работой, совершаемой при перемещении единицы заряда на данном участке цепи. Работа же по перемещению заряда во всех последовательно соединенных проводниках равна сумме работ на отдельных проводниках.

Обозначим через R сопротивление всего участка цепи. На основании закона Ома можно написать:

$$U = IR. \qquad (4)$$

Из равенства (3) и (4) следует, что

$$R = R_1 + R_2.$$

Совершенно аналогично можно показать, что в случае n последовательно соединённых проводников общее сопротивление цепи:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n.$$

Сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединённых проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

Пример. Определить сопротивление цепи, состоящей из двух проводников сопротивлением по 0,5 *ома* каждый, дуговой лампы сопротивлением 1,5 *ома* и реостата сопротивлением 2,3 *ома*, а также напряжение на каждом из участков цепи, если по цепи идёт ток 30 *а*.

Общее сопротивление цепи:

$$R=0{,}5+0{,}5+1{,}5+2{,}3=4{,}8 \text{ ом}.$$

Напряжение на каждом из проводов: $0{,}5\cdot 30=15$ *в* и на дуговой лампе: $1{,}5\cdot 30=45$ *в*.

Напряжение на реостате: $2{,}3\cdot 30=69$ *в*.

Общее напряжение на концах всей цепи:

$$69 \text{ в}+45 \text{ в}+15\cdot 2 \text{ в}=144 \text{ в}=30 \text{ а}\cdot 4{,}8 \text{ ом}.$$

44. Параллельное соединение проводников. Рассмотрим теперь соединение проводников, изображённое на рисунке 62. Такое соединение называется параллельным.

При параллельном соединении ток распределяется по проводникам так же, как поток воды, разветвляющийся на два параллельных канала. Количество воды, протекающее ежесекундно через неразветвлённую часть потока воды, равно сумме количеств воды, протекающих ежесекундно через каждый из каналов. Аналогично обстоит дело и с прохождением электрических зарядов через параллельно соединённые проводники. Включив амперметры в цепь до разветвления и в каждую ветвь разветвления, можно убедиться, что ток в неразветвлённой части цепи I равен сумме токов (I_1+I_2), текущих в отдельных параллельно соединённых проводниках:

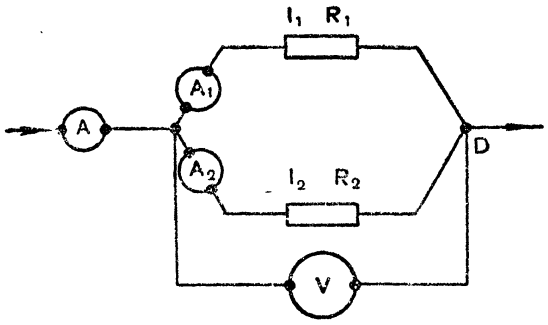


Рис. 62. Параллельное соединение проводников.

$$I=I_1+I_2. \qquad (1)$$

Этот опыт служит лишь подтверждением того, что в случае установившегося тока электрические заряды не скопляются в точках разветвления, а сколько их подходит к точкам разветвления, столько же и уходит.

Если сопротивление каждого из участков разветвлённой части цепи обозначить через R_1 и R_2, а напряжение на разветвлении через U, то на основании закона Ома можно написать:

$$I_1=\frac{U}{R_1}; \quad I_2=\frac{U}{R_2}, \qquad (2)$$

или

$$U=I_1R_1;\ U=I_2R_2. \tag{3}$$

Приравнивая правые части равенства (3), получим:

$$I_1R_1=I_2R_2, \tag{4}$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2}{R_1}.$$

Токи в отдельных ветвях разветвлённой части цепи обратно пропорциональны их сопротивлениям.

Складывая правые и левые части равенства (2) и приравнивая их между собой, получаем:

$$I_1+I_2=\frac{U}{R_1}+\frac{U}{R_2}=U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right).$$

Так как

$$I_1+I_2=I,$$

то

$$I=U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right). \tag{5}$$

Обозначим общее сопротивление разветвлённой части цепи через R. На основании закона Ома можно написать:

$$I=U\frac{1}{R}. \tag{6}$$

Из сравнения равенств (5) и (6) следует:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}. \tag{7}$$

Величина, обратная сопротивлению всего параллельного соединения, равна сумме обратных величин сопротивлений параллельных ветвей.

Найдём из равенства (7) сопротивление R и сравним его величину с сопротивлениями отдельных ветвей цепи:

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}. \tag{8}$$

Допустим, что $R_1<R_2$. Тогда, поскольку $R_1<(R_1+R_2)$, то $\frac{R_2}{R_1+R_2}$ — правильная дробь и, следовательно, $R<R_1$.

Общее сопротивление разветвлённой части цепи меньше наименьшего из сопротивлений её ветвей.

Нетрудно показать, что если в разветвление будет включено не два, а несколько проводников с сопротивлениями R_1, R_2, R_3 и т. д. до R_n, то в этом случае:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\ \cdots\ +\frac{1}{R_n}. \tag{9}$$

Если вместо сопротивлений проводников ввести их проводимости k, k_1, k_2, ... , k_n, то формулу (9) можно записать в следующем виде:

$$k = k_1 + k_2 + \cdots + k_n.$$

Проводимость цепи, состоящей из нескольких параллельных участков, равна сумме проводимости этих участков.

Если сопротивления отдельных ветвей равны между собой:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \cdots = r,$$

то из уравнения (9) получаем:

$$\frac{1}{R} = n\frac{1}{r},$$

откуда

$$R = \frac{r}{n}.$$

Общее сопротивление участка цепи, состоящего из n параллельно соединённых проводников с одинаковым сопротивлением, в n раз меньше сопротивления одного из них.

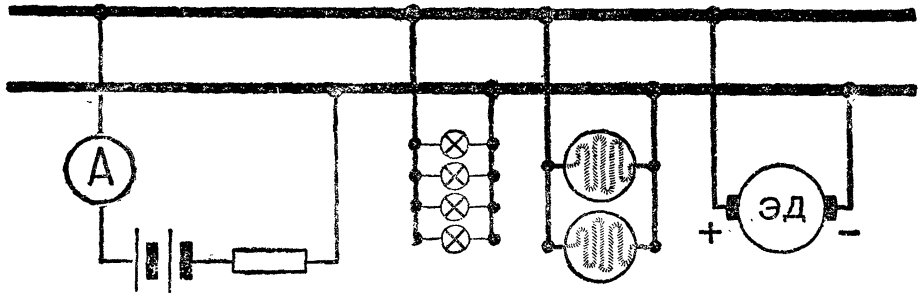


Рис. 63. Параллельное включение в сеть различных потребителей электроэнергии.

Параллельное включение есть основной способ включения в электрическую цепь различных потребителей. Цепь, питающая током какой-нибудь большой населённый пункт, представляет собой систему параллельно соединённых проводников. Основная линия распадается на параллельные линии, идущие к отдельным районам. Эти районные линии в свою очередь разветвляются на более мелкие, обслуживающие отдельные улицы, здания, предприятия. Но и эти линии в свою очередь разветвляются на всё более мелкие ветви, пока, наконец, в отдельные конечные ветви не окажутся включёнными непосредственные потребители электрической энергии: электродвигатели в цехах заводов, лампы в зданиях, электродвигатели и лампы в вагонах трамваев, троллейбусов, метро и т. д.

В одну и ту же электрическую цепь параллельно могут быть включены самые различные потребители. Так, на рисунке 63 по-

казано параллельное включение электрических лампочек, нагревательных приборов, электродвигателя и аккумуляторов, поставленных на зарядку.

Следует иметь в виду, что параллельно включаемые в данную цепь потребители должны быть рассчитаны на одно и то же напряжение, соответствующее напряжению в цепи.

45. Расчёт цепи. Основная задача расчёта цепи сводится к определению токов, текущих в отдельных участках её, по заданному напряжению и по сопротивлениям отдельных проводников.

Рассмотрим цепь, изображённую на рисунке 64.

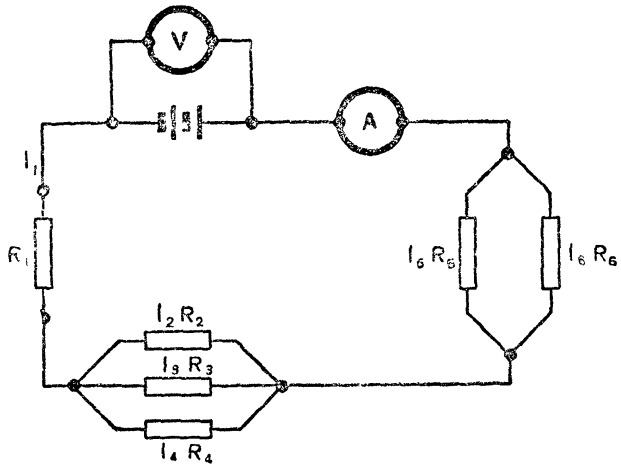


Рис. 64.

Пусть нам известно общее напряжение U, питающее цепь, и сопротивления включённых в цепь проводников: $R_1, R_2, \ldots, R_6$; сопротивлением амперметра пренебрегаем. Надо найти токи $I_1, I_2, \ldots, I_6$.

Прежде всего мы должны установить, из скольких последовательных участков состоит наша цепь. Легко видеть, что таких участков три, причём второй и третий участки представляют собой разветвления. Обозначим сопротивления трёх последовательных участков нашей цепи через R_I, R_{II}, R_{III}. Тогда всё сопротивление цепи R выразится как сумма сопротивлений этих участков:

$$R = R_I + R_{II} + R_{III}.$$

Общее сопротивление цепи необходимо знать, так как заданное общее напряжение U можно отнести только к полному общему сопротивлению R цепи. Применяя закон Ома, мы найдём полный ток I, текущий в нашей цепи:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Нетрудно видеть, что $I = I_1$.

Для того чтобы найти токи в отдельных ветвях, надо предварительно найти напряжение на отдельных участках последовательных цепей.

По закону Ома:

$$U_1 = IR_I;\ U_2 = IR_{II};\ U_3 = IR_{III}.$$

Сопротивления R_{II} и R_{III} легко найти по закону параллельного соединения.

Зная напряжения на отдельных разветвлениях, найдём и токи в отдельных ветвях:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2};\quad I_3 = \frac{U_2}{R_3};\quad I_4 = \frac{U_2}{R_4};\quad I_5 = \frac{U_3}{R_5};\quad I_6 = \frac{U_3}{R_6}.$$

Задача, поставленная перед нами, полностью разрешена.

В других случаях расчёт цепи может заключаться: а) в нахождении сопротивлений отдельных участков цепи по заданным напряжению, токам и сопротивлениям других участков; б) в расчёте необходимого напряжения по известным сопротивлениям и токам. Но метод расчёта остаётся один и тот же; во всех случаях он основывается на законе Ома.

Для лучшего усвоения и понимания закономерностей в цепях рассмотрим ещё один пример.

В сеть городского тока напряжением 127 *в* включена лампочка с сопротивлением 125 *ом*. Сопротивление проводов, подводящих к лампочке ток, 2 *ома*. Под каким напряжением будет гореть лампочка, если параллельно ей включить электрический нагревательный прибор, сопротивление которого 25 *ом*?

В отсутствии нагревательного прибора ток в цепи был:

$$I_1 = \frac{127\ в}{(125+2)\ ом} = 1а.$$

Напряжение на лампочке $U_1 = 125\ ом \cdot 1\ а = 125\ в$.

Напряжение на подводящих проводах $U_1' = 2\ ом \cdot 1\ а = 2\ в$.

При включении нагревательного прибора сопротивление участка цепи, состоящего из этого прибора и лампочки, найдётся из равенства:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{125} + \frac{1}{25} = \frac{6}{125};\qquad R = \frac{125}{6} \approx 20{,}8\ ом.$$

Сопротивление всей цепи станет равным:

$$20{,}8\ ом + 2\ ом = 22{,}8\ ом.$$

Ток в цепи:

$$I_2 = \frac{127\ в}{22{,}8\ ом} \approx 5{,}6\ а.$$

Напряжение на подводящих проводах возросло и стало равным:

$$U_2' = 2\ ом \cdot 5{,}6\ а = 11{,}2\ в.$$

Напряжение на лампочке и нагревательном приборе уменьшилось и стало равным:

$$127\ в - 11{,}2\ в = 115{,}8\ в.$$

Таким образом, включение нагревательного прибора понижает напряжение на лампочке почти на 9 *в*. Накал лампочки при этом уменьшается, что и наблюдается на практике.

Итак, чем больше напряжение, приходящееся на провода, тем меньше напряжение на лампочке и нагревательном приборе. Поэтому напряжение на проводах называется потерянным. Оно

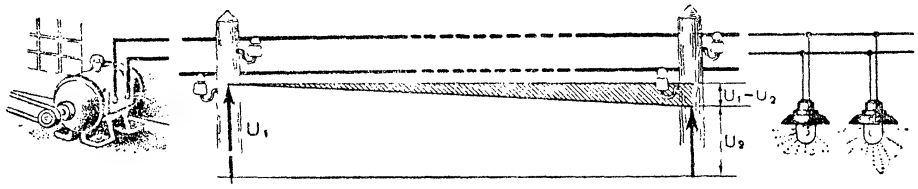


Рис. 65. Потеря напряжения при передаче электроэнергии от генератора к потребителю.

тем больше, чем больше сопротивление проводов и чем больше ток, идущий по ним.

Особенно велики потери напряжения в длинных линиях, передающих ток от электростанций на десятки и сотни километров.

На рисунке 65 показана потеря напряжения в проводах при передаче электрической энергии от генератора к потребителю. U_1 — напряжение в начале линии передачи, условно показано на рисунке стрелкой, U_2 — напряжение на конце линии передачи и $U_1 - U_2$ — потеря напряжения в проводах линии.

Упражнение 9.

1. Начертите схему электрической проводки в комнате, где вы живёте.

2. В комнатной электропроводке включено параллельно 4 лампы, каждая с сопротивлением 330 *ом*. Ток в лампе 0,3 *а*. Определить ток, текущий по магистрали, и сопротивление данной группы ламп.

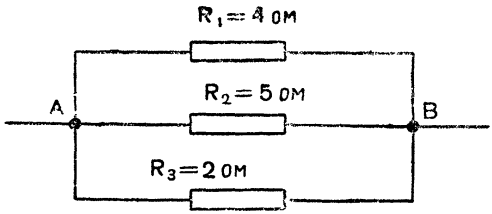


Рис. 66. Цепь для расчёта.

3. От группового распределительного щитка ток идёт на две параллельные группы. В первой группе включено параллельно 10 ламп, каждая с сопротивлением 250 *ом*, во второй группе 5 ламп, каждая с сопротивлением 300 *ом*. Найти ток в каждой группе, если ток, подводимый к щитку, равен 6,8 *а*.

4. Между точками *A* и *B* включены три сопротивления (рис. 66). Определить общее сопротивление разветвлённой части цепи, напряжение на концах разветвлённой части цепи, ток в каждом из проводников, если ток в неразветвлённой части цепи 5 *а*.

5. Ток 1 *а* идёт по двум ветвям, из которых одна ветвь имеет сопротивление 4,5 *ома* и по ней идёт 0,1 часть главного тока. Определить величину сопротивления второй ветви и общее сопротивление разветвлённой части цепи.

6. Какова величина тока, текущего в магистрали от источника тока напряжением 100 *в*, если сопротивление проводов магистрали 10 *ом* и в эту магистраль включены параллельно проводники с сопротивлениями 20, 40, 50 и 200 *ом*?

46. Шунтирование измерительных приборов. Измерения токов, текущих по цепям, производятся амперметрами. Эти приборы должны обладать возможно малым сопротивлением, так как они вводятся в цепь последовательно со всеми другими проводниками, через которые проходит измеряемый ток.

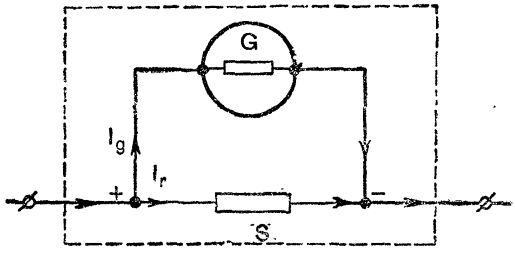


Рис. 67. Схема устройства амперметра.

Амперметр представляет собой весьма чувствительный к току прибор G (гальванометр), снабжённый параллельно присоединённым к нему проводником S (рис. 67). Проводник (S), присоединяемый параллельно к прибору, называется шунтом. Подбирая сопротивление шунта, можно изготовить амперметр, обладающий малым сопротивлением и пригодный для измерений требуемых токов.

Пусть сопротивление гальванометра R, ток в нём I_g, сопротивление шунта r и ток в нём I_r. Пусть далее сопротивление гальванометра в n раз больше сопротивления шунта, т. е. $\frac{R}{r} = n$.

Токи в двух проводниках, соединённых параллельно, обратно пропорциональны сопротивлениям:

$$\frac{I_r}{I_g} = \frac{R}{r}, \text{ или } I_r = I_g n.$$

Полный ток в неразветвлённой части цепи $I = I_r + I_g$, или $I = I_g(n+1)$, откуда

$$I_g = \frac{I}{n+1}.$$

Таким образом, ток в гальванометре в $(n+1)$ раз меньше, чем ток I в главной цепи.

Следовательно, благодаря шунту мы можем измерить с помощью нашего прибора токи в $(n+1)$ раз бо́льшие, чем те, на которые он рассчитан. При этом прибор регистрирует только $\frac{1}{n+1}$ часть измеряемого тока. В этом случае цена одного деления шкалы будет увеличена в $(n+1)$ раз.

На рисунке 68 показан шунт, расположенный в той же коробке, в которой заключён гальванометр. На рисунке 69 изображён шунт, приключённый к прибору для измерения больших

токов (до 500 *а*). Иногда делают несколько шунтов, чтобы получить амперметр с несколькими пределами измерений.

Пример 1. Шкала миллиамперметра имеет 150 делений: одно деление соответствует 1 миллиамперу (*ма*), т. е. 0,001 *а*, сопротивление прибора равно 1 *ому*. Каким сопротивлением должен обладать шунт, чтобы можно было применять этот прибор для измерения токов в пределах от нуля до 15 *а*?

По условию задачи максимальный ток, проходящий через прибор, равен $150 \cdot 0{,}001\ а = 0{,}15\ а$. Следовательно, через шунт должен проходить весь остальной ток, т. е. $15\ а - 0{,}15\ а = 14{,}85\ а$.

Токи в приборе и шунте обратно пропорциональны их сопротивлениям. Обозначая искомое сопротивление шунта буквой r, можно написать:

$$\frac{0{,}15\ а}{14{,}85\ а} = \frac{r}{1\ ом},$$

откуда

$$r = \frac{0{,}15}{14{,}85} = \frac{1}{99}\ ом.$$

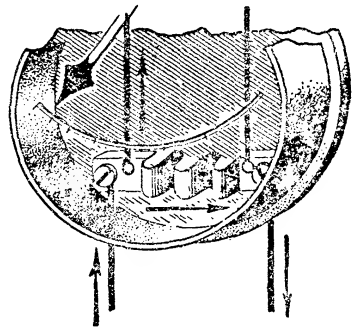


Рис. 68. Шунт внутри коробки гальванометра.

Так как сопротивление шунта очень мало, то практически сопротивление всего прибора равно сопротивлению шунта.

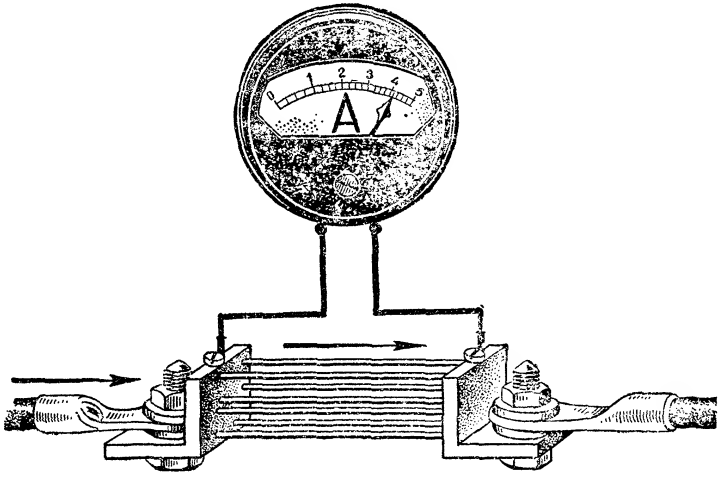


Рис. 69. Шунт к прибору для измерения сильных токов.

Пример 2. Рассчитать сопротивление шунта к прибору, сопротивление которого 10 *ом* и наибольший допустимый ток 5 *ма*, чтобы этим прибором можно было измерять токи до 5 *а*.

Так как измеряемый ток $I=5$ *а*, а допустимый ток для катушки амперметра $I_1=0{,}005$ *а*, то ток, проходящий по шунту $I_2=I-I_1$, должен составлять 4,995 *а*, и, следовательно, сопротивление шунта должно быть:

$$r=10\cdot\frac{0{,}005}{4{,}995}\approx 0{,}01 \text{ ом}.$$

47. Вольтметр. Большинство измерительных приборов, применяемых для измерений в электрических цепях, реагирует на ток, т. е. они по самой своей природе служат измерителями тока.

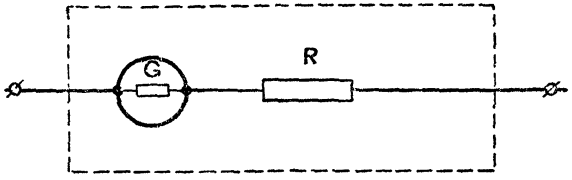


Рис. 70. Схема устройства вольтметра.

Но напряжение и ток, согласно закону Ома, пропорциональны друг другу, поэтому обе эти величины могут быть измерены при помощи одного и того же прибора. Только шкала прибора в одном случае градуируется на ток, в другом — на напряжение. Прибор, шкала которого проградуирована в вольтах, называется вольтметром.

Вольтметр представляет собой чувствительный гальванометр G, к которому последовательно присоединяется добавочное сопротивление R (рис. 70).

Приключим вольтметр к каким-нибудь двум точкам цепи M и N (рис. 71). Через него при этом пойдёт некоторый ток I_1, и стрелка прибора отклонится на некоторый угол. Но на шкале прибора против положения стрелки отмечается не ток I_1, регистрируемый прибором, а величина напряжения U_1, существующего на участке цепи MN, к которому приключён вольтметр, равная падению напряжения в приборе: $U_1=I_1R$, где R — сопротивление вольтметра. Если теперь включить прибор между точкой M и точкой K, лежащей посередине между M и N, то через прибор пойдёт ток I_2 меньший, так как напряжение на зажимах прибора $U_2=I_2R$ станет меньше; оно также наносится на шкалу. Таким путём шкалу прибора можно проградуировать в единицах напряжения. Обычно градуировка вольтметра производится путём сравнения его показаний с показаниями эталонного (образцового) вольтметра.

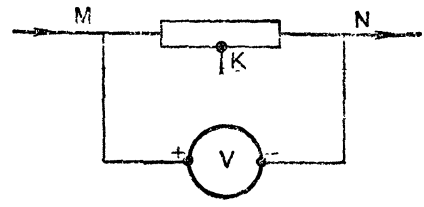


Рис. 71. Включение вольтметра в цепь.

Вольтметр, как мы знаем, включается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором измеряется.

Включение вольтметра между точками M и N цепи (рис. 71) изменяет напряжение, существующее между ними до этого, так как сам вольтметр при этом образует новый участок цепи, параллельный исследуемому.

Каким же сопротивлением должен обладать вольтметр, чтобы эти изменения напряжений в цепи были незначительными?

Пусть сопротивление проводника между точками M и N равно r, а сопротивление вольтметра R. После включения вольтметра сопротивление R_x участка цепи между точками M и N найдётся из равенства (§ 44):

$$\frac{1}{R_x}=\frac{1}{r}+\frac{1}{R};\quad R_x=\frac{R\cdot r}{R+r}.$$

Приведём эту формулу к виду, удобному для исследования:

$$R_x=r\,\frac{1}{1+\frac{r}{R}},$$

откуда видно, что сопротивление R_x тем меньше отличается от r, чем меньше дробь $\frac{r}{R}$, т. е. чем больше сопротивление R вольтметра по сравнению с сопротивлением r участка цепи, на концах которого измеряется напряжение. Если это условие выполнено, то напряжение, измеряемое вольтметром, мало отличается от напряжения, существовавшего до присоединения вольтметра (практически не отличается).

Итак, вольтметр можно применять вместо электрометра для измерения напряжения на таких участках цепи, сопротивление которых мало по сравнению с сопротивлением вольтметра.

48. Добавочное сопротивление к вольтметру. Каждый измерительный прибор изготовляют, рассчитывая его на определённый максимальный для него ток. Поэтому для каждого измерительного прибора существует предельное значение измеряемой им величины тока или напряжения. Существуют амперметры на 1; 5; 10; 50 *а* и т. д.; также имеются и вольтметры на различные напряжения. Но всегда оказывается возможным расширить пределы измерения данного прибора, или, как говорят, увеличить цену деления его шкалы. Как повысить цену деления шкалы амперметра, было уже рассмотрено в § 46.

Для того чтобы повысить цену деления вольтметра и таким образом приспособить его к измерению напряжений бóльших, чем то, на которое он рассчитан, надо последовательно с ним включить проводник, обладающий некоторым сопротивлением. Величину этого сопротивления легко рассчитать.

Пусть мы располагаем вольтметром на 10 *в*, а нам предстоит измерять напряжения до 100 *в*. Если мы наш вольтметр приключим к участку с напряжением 100 *в*, то обмотка этого прибора

перегорит, так как через него пройдёт ток в 10 раз больший, чем тот, на который он рассчитан. На приборе наибольшее напряжение может быть 10 *в*, остальные же 90 *в* должны приходиться на проводник с добавочным сопротивлением R_x, которое нужно включить последовательно с вольтметром (рис. 72).

Так как при последовательном соединении напряжения на отдельных участках цепи пропорциональны сопротивлениям этих участков (§ 43), то величину добавочного сопротивления найдём из пропорции:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{100-10}{10};\quad R_x = 9R,$$

где R — сопротивление вольтметра.

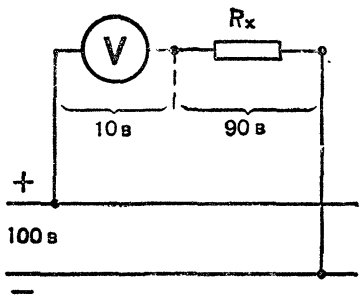


Рис. 72. К расчёту величины добавочного сопротивления к вольтметру.

Таким образом, добавочное сопротивление должно быть в 9 раз больше сопротивления вольтметра.

Цена одного деления шкалы вольтметра с таким добавочным сопротивлением будет в десять раз больше цены деления основной шкалы.

На рисунке 73 изображено добавочное сопротивление, находящееся внутри прибора.

В настоящее время, главным образом для нужд лабораторий, изготовляют универсальные приборы, снабжаемые набором шунтов и дополнительных сопротивлений. Такие приборы используются как для измерений токов, так и для измерения напряжений и в очень широких пределах. Например, можно измерять токи от 1 *ма* до сотен ампер. Так же широк диапазон измеряемых напряжений. На рисунке 74 изображён широко распространённый в школьной практике универсальный школьный гальванометр; внизу рисунка показаны шунты (*а*, *б*) и добавочное сопротивление (*в*), приключаемые к гальванометру.

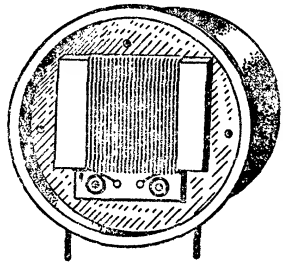


Рис. 73. Добавочное сопротивление в приборе.

Пример. Рассчитать, какое потребуется добавочное сопротивление к вольтметру на 3 *в* с сопротивлением 300 *ом*, чтобы измерять им напряжения до 120 *в*.

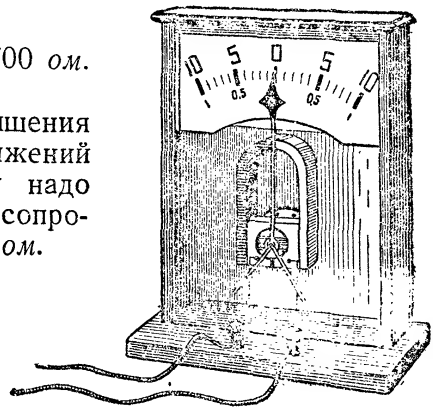
Решение. На приборе наибольшее напряжение 3 вольта, 117 вольт из 120 вольт должны приходиться на проводник с добавочным сопротивлением R_x, которое найдётся из равенства:

$$\frac{(120-3)\,в}{3\,в} = \frac{R_x}{300\,ом}.$$

Откуда

$$R_x = \frac{300\ ом\ (120 - 3)\ в}{3\ в} = 11\,700\ ом.$$

Следовательно, для повышения предела измерения напряжений до 120 *в* к вольтметру надо подобрать добавочное сопротивление, равное 11 700 *ом*.



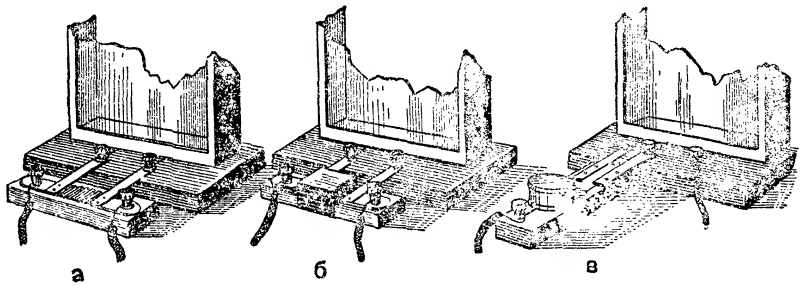


Рис. 74. Универсальный школьный гальванометр с шунтами и добавочным сопротивлением.

49. Определение сопротивления проводников при помощи амперметра и вольтметра. На рисунке 75 изображена схема расположения приборов для измерения сопротивления проводника. *A* — амперметр, его показание *I*; *V* — вольтметр, измеряющий напряжение *U* на концах проводника с искомым сопротивлением r_x. Ток в измеряемом проводнике I_x, сопротивление вольтметра *R*.

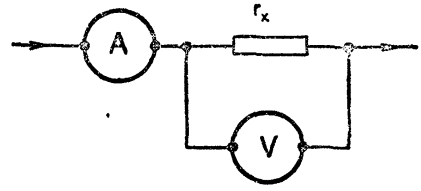


Рис. 75. Схема для определения сопротивления проводников при помощи амперметра и вольтметра.

По закону Ома ток, текущий по проводнику с искомым сопротивлением, определится из равенства $I_x = \frac{U}{r_x}$; ток же, ответвляющийся в вольтметр, будет равен $\frac{U}{R}$. Следовательно, ток I_x, текущий по исследуемому проводнику, определится из равенства:

$$I_x = I - \frac{U}{R}.$$

Искомое же сопротивление r_x может быть вычислено по следующей формуле, удобной для исследования:

$$r_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R}}.$$

Если сопротивление вольтметра так велико, что ток $\frac{U}{R}$ меньше, чем допустимые ошибки измерения тока при помощи данного амперметра, то величиной $\frac{U}{R}$ можно пренебречь и тогда

$$r_x = \frac{U}{I}.$$

Рассмотренный пример ещё раз показывает, что сопротивление вольтметра должно быть велико по сравнению с измеряемым сопротивлением.

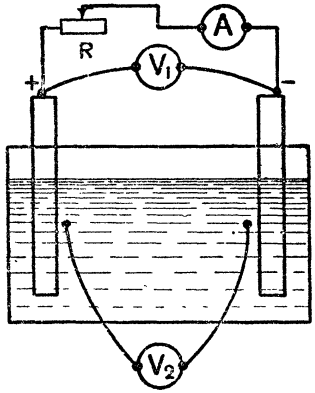


Рис. 76. Схема установки для проверки закона Ома для полной цепи.

50. Закон Ома для полной цепи. Всякая полная цепь электрического тока состоит из двух частей: внешней и внутренней. Внешнюю часть цепи составляют различные потребители и подводящие провода, во внутреннюю же часть цепи входит источник тока. Когда цепь замкнута, то электрический ток существует как во внешней, так и во внутренней части цепи. Так как источник тока также обладает сопротивлением, то падение напряжения имеет место как во внешней, так и во внутренней части цепи.

Включим в цепь какого-нибудь гальванического элемента сопротивление и определим на опыте сумму падений напряжения во внешней и внутренней частях цепи. Схема установки для такого опыта изображена на рисунке 76. В этой установке во внешнюю цепь гальванического элемента включён амперметр A и реостат R. Падение напряжения во внешней части цепи измеряется вольтметром V_1, который приключён к зажимам элемента, а вольтметр V_2 измеряет падение напряжения на внутреннем сопротивлении элемента. Для этого с помощью двух щупов, изготовленных из одинакового химически чистого металла (например, из электролитической меди) или двух углей, вольтметр V_2 приключается к электролиту в точках, находящихся в непосредственной близости от электродов.

Реостатом R можно менять ток в цепи; при этом будут меняться показания вольтметров V_1 и V_2, т. е. величины падения напряжения во внешней и внутренней частях цепи.

Ниже в таблице приведены результаты одного из таких опытов, проведённых с элементом Вольта.

№ п/п	Ток в миллиамперах	Падение напряжения во внешней части цепи в вольтах	Падение напряжения во внутренней части цепи в вольтах	Сумма падений напряжения по всей цепи в вольтах
1	0	1,02	0	1,02
2	130	0,88	0,15	1,03
3	175	0,80	0,22	1,02
4	230	0,71	0,29	1,00
5	290	0,65	0,35	1,00
6	Короткое замыкание	0,21	0,81	1,02

Из таблицы видно, что сумма падений напряжения во внешней и внутренней частях цепи в пределах погрешностей опыта есть величина постоянная, в среднем равная 1,02 *в*.

Если измерить напряжение на зажимах элемента при разомкнутой внешней цепи, то оно окажется равным также 1,02 *в*. Таким образом, опыт показывает, что сумма падений напряжений на всех участках замкнутой цепи равна напряжению на полюсах источника тока при разомкнутой внешней цепи. Но напряжение или разность потенциалов на полюсах источника тока при разомкнутой внешней цепи, согласно нашему определению (§ 33), равно электродвижущей силе источника тока.

Следовательно, ***электродвижущая сила источника тока равна сумме падений напряжений на всех участках замкнутой электрической цепи.***

Это равенство является непосредственным следствием закона сохранения энергии в применении к замкнутой электрической цепи. Действительно, источник тока совершает работу по разделению зарядов, в результате которой возникает электрическая энергия. Мерой этой работы источника, отнесённой к единице заряда, является электродвижущая сила источника.

В замкнутой цепи как во внешней, так и во внутренней её части при движении зарядов происходит превращение электрической энергии в другие виды энергии, т. е. совершается работа. Мерой этой работы, отнесённой к единице заряда, является сумма падений напряжения, взятая по всей замкнутой цепи. По закону сохранения энергии работа источника тока равняется работе тока в электрической цепи.

Обозначим сопротивление внешней части цепи через R, а внутренней через r.

Пусть ток в цепи I, а электродвижущая сила источника тока E.

Согласно определению э. д. с., можно написать:

$$E=IR+Ir, \text{ или } E=I(R+r).$$

Отсюда

$$I=\frac{E}{R+r}. \qquad (1)$$

Равенство (1) представляет собой математическое выражение закона Ома для полной цепи, который формулируется следующим образом:

Ток в цепи прямо пропорционален электродвижущей силе источника и обратно пропорционален сопротивлению всей цепи.

51. Электродвижущая сила и напряжение на зажимах источника тока. Электродвижущая сила данного источника тока есть величина постоянная, не зависящая от состава цепи, в которую источник включается. Падение же напряжения во внешней части цепи $U=IR$ отнюдь не есть величина постоянная для данного источника (падение напряжения во внешней части цепи иногда называют напряжением на зажимах источника тока).

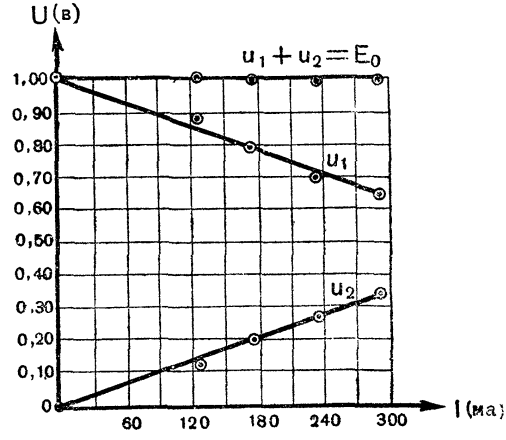


Рис. 77. График, демонстрирующий справедливость закона Ома для полной цепи.

На рисунке 77 показана графическая обработка данных измерений, описанных в предыдущем параграфе (см. таблицу, стр. 81).

Две линии на этом графике изображают падение напряжения в зависимости от тока в цепи. Верхняя из них относится к внешней части цепи, нижняя — к внутренней.

Графики наглядно показывают, что с увеличением тока в цепи напряжение на зажимах источника тока падает. Во внутренней же части цепи падение напряжения увеличивается. Сумма падений напряжений, взятая по всей замкнутой цепи ($U_1+U_2=E$), остаётся величиной постоянной, равной э. д. с. источника тока.

При разомкнутой цепи ($I=0$) напряжение на зажимах элемента наибольшее, равное э. д. с. источника. При коротком замыкании (сопротивление внешней цепи очень мало) напряжение на зажимах элемента наименьшее и, соответственно, падение напряжения во внутренней части цепи наибольшее.

К таким же результатам мы придём, анализируя формулу закона Ома для полной цепи:

$$I=\frac{E}{R+r}, \qquad (1)$$

которую можно представить в виде:

$$IR=E-Ir, \text{ или } U=E-Ir. \qquad (2)$$

Подставив в равенство (2) значение тока $I=\frac{E}{R+r}$, получим удобную для исследования формулу:

$$U=E\left(1-\frac{r}{R+r}\right). \qquad (3)$$

Так как внутреннее сопротивление r данного источника можно приближённо считать величиной постоянной, то в правой части равенства (3) будет только одна переменная величина — внешнее сопротивление R. Чем больше будет величина внешнего сопротивления, тем дробь $\frac{r}{R+r}$ будет меньше.

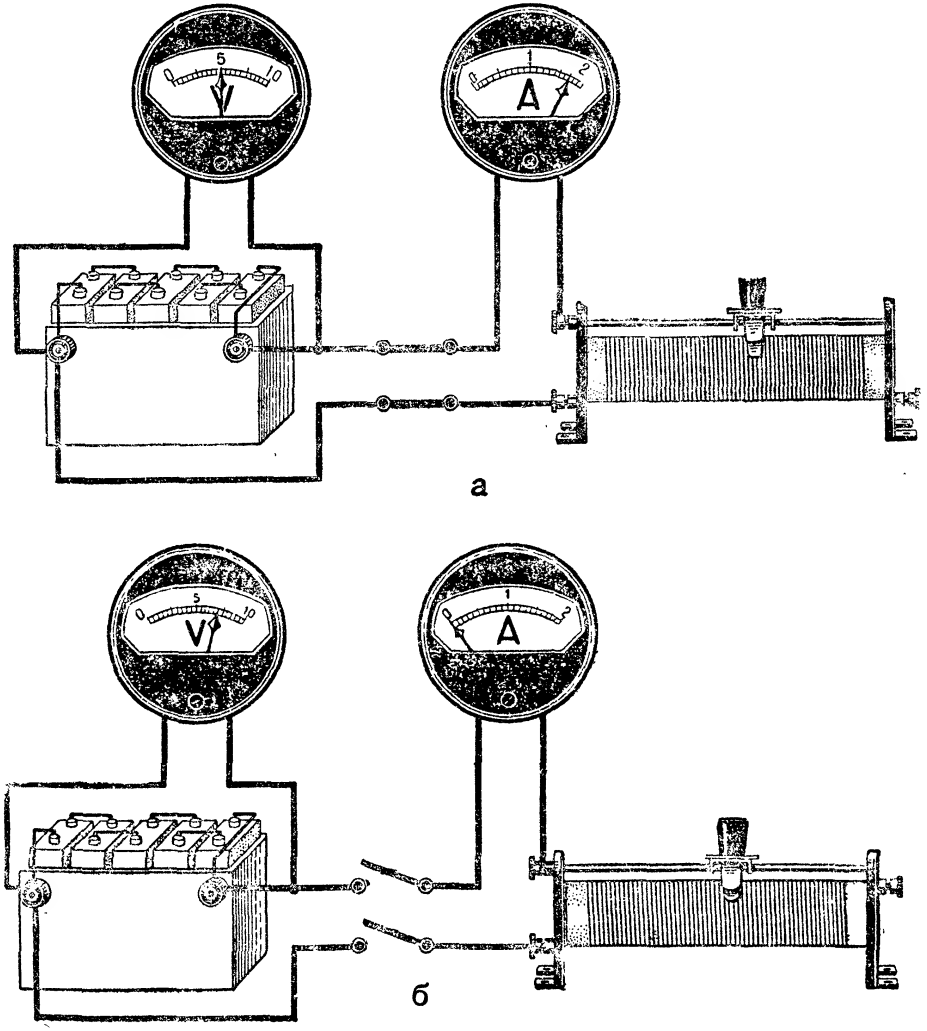


Рис. 78. Напряжение на полюсах источника тока: а) при замкнутой цепи, б) при разомкнутой цепи.

В предельном случае при разомкнутой цепи $\frac{r}{R+r}=0$, так как $R\to\infty$ и, следовательно, напряжение на зажимах источника U становится равным его электродвижущей силе.

Итак, *наибольшим значением напряжения на зажимах источника будет его значение, равное величине э. д. с. Это произойдёт тогда, когда ток в цепи будет равен нулю, т. е. когда цепь будет разомкнута.*

На рисунке 78, *а* вольтметр показывает напряжение на полюсах источника тока при замкнутой цепи. На рисунке 78, *б* тот же вольтметр показывает напряжение на полюсах источника тока при разомкнутой цепи, т. е. э. д. с. источника.

Однако если мы приключим вольтметр к зажимам источника при разомкнутой цепи, то, строго говоря, напряжение, которое покажет вольтметр, не будет равно э. д. с., так как вольтметр сам в этом случае будет служить внешней цепью, и она им будет замкнута. Но так как сопротивление вольтметра велико, то различие между его показанием и величиной э. д. с. будет незначительно. При наличии высокоомного вольтметра им без большой ошибки можно пользоваться для измерения э. д. с. Конечно, существуют способы и более точного измерения э. д. с.

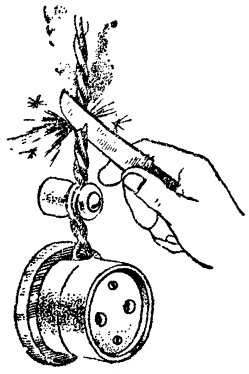


Рис. 79. Зачистка проводов под напряжением может привести к короткому замыканию и порче сети.

52. Короткое замыкание. При уменьшении сопротивления внешнего участка цепи и, следовательно, при увеличении тока в цепи напряжение на зажимах будет уменьшаться и может стать практически равным нулю. Это произойдёт тогда, когда сопротивление внешнего участка цепи будет величиной, близкой к нулю. Такой случай получил в технике название короткого замыкания. При коротком замыкании источник тока даёт максимальный для него ток:

$$I_{max}=\frac{E}{r},\ \text{так как}\ R\to 0.$$

Ток короткого замыкания, как видно из приведённой выше формулы, зависит не только от э. д. с. источника, но и от его внутреннего сопротивления. Внутреннее сопротивление гальванических элементов, например, велико; поэтому ток короткого замыкания у них сравнительно небольшой и вполне для них безвреден. Иное дело в свинцовых аккумуляторах: внутреннее сопротивление их мало (порядка 0,1—0,01 *ом*), поэтому ток короткого замыкания очень велик, и он может разрушить пластины аккумулятора. Чрезвычайно также опасны короткие замыкания в силовых или осветительных цепях, питаемых мощными генераторами элек-

тростанций. При значительных напряжениях (127 *в*; 220 *в* и т. д.) ток короткого замыкания может достигнуть огромной величины. В этом случае короткое замыкание может вызвать порчу проводов (рис. 79 и 80) и даже пожар здания. Чтобы избежать этого, в цепях должны включаться плавкие предохранители или даже целая система специальных предохранителей, так называемая релейная защита.

Упражнение 10.

1. Элемент Лекланше с внутренним сопротивлением 5 *ом* и электродвижущей силой 1,5 *в* замкнут проводником, сопротивление которого 20 *ом*. Как велик ток?

2. Внутреннее сопротивление генератора постоянного тока равно 0,1 *ом*, сопротивление внешней цепи равно 4,8 *ом*. Определить ток в цепи и электродвижущую силу генератора, если напряжение на зажимах его равно 120 *в*.

3. При каком соотношении между внутренним и внешним сопротивлением цепи напряжение на зажимах источника тока будет составлять 50% э. д. с. элемента?

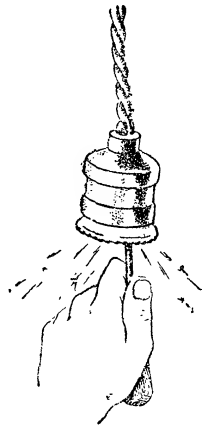


Рис. 80. Ток короткого замыкания может возникнуть при ремонте патрона под напряжением.

53. Соединение элементов в батарею. Соединение элементов в батарею может быть последовательным и параллельным.

При последовательном соединении два соседних элемента соединяются друг с другом своими разноимёнными полюсами. Чему равна э. д. с. такой батареи? Разберём это на примере соединения в батарею

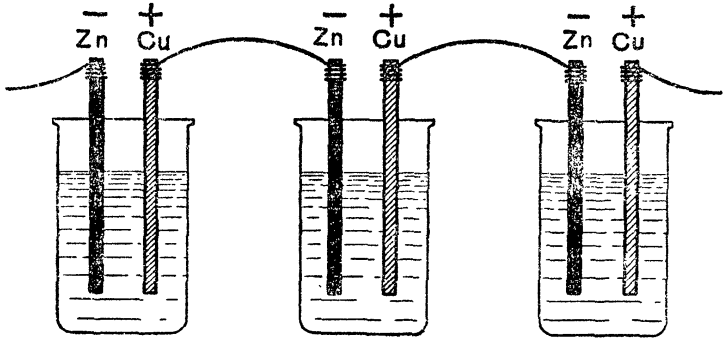


Рис. 81. Последовательное соединение элементов Вольта.

элементов Вольта (рис. 81). Каждый положительный электрод элемента имеет потенциал на 1,1 *в* выше, чем отрицательный электрод. Положительный и отрицательный электроды двух соседних элементов соединены проводником, следовательно, име-

ют одинаковый потенциал. Поэтому разность потенциалов между положительным полюсом второго элемента и отрицательным полюсом первого будет уже 1,1 *в*+1,1 *в*=2,2 *в* и т. д. Если всего имеется *n* элементов, то разность потенциалов крайних электродов при разомкнутой цепи (т. е. э. д. с. батареи) будет в *n* раз больше, чем у одного элемента.

Итак, ***при последовательном соединении э. д. с. батареи равна сумме э. д. с. источников, составляющих батарею.***

Общее сопротивление батареи последовательно соединённых элементов равно сумме внутренних сопротивлений отдельных элементов. Схема последовательного соединения изображена на рисунке 82а.

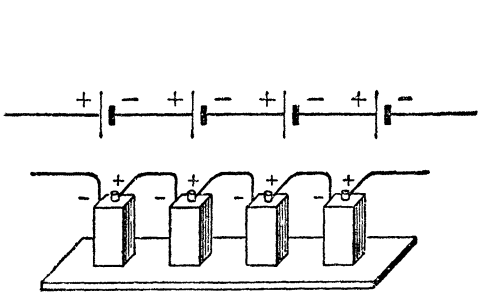


Рис. 82а. Схема последовательного соединения элементов.

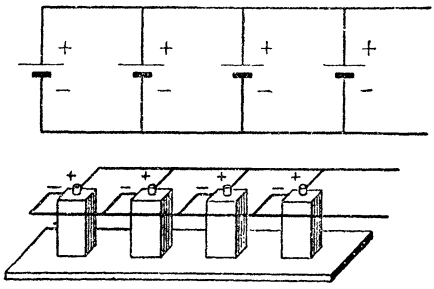


Рис. 82б. Схема параллельного соединения элементов.

На рисунке 82б схематически показано параллельное соединение одинаковых элементов. Его получают, соединяя между собой все положительные и все отрицательные полюсы элементов.

При таком соединении напряжение на разомкнутой батарее такое же, как на каждом отдельном элементе. Следовательно, ***при параллельном соединении одинаковых источников тока э. д. с. батареи равна э. д. с. одного источника.***

Сопротивление батареи при параллельном соединении элементов будет меньше сопротивления одного элемента, потому что при параллельном соединении проводников вообще, а следовательно, и элементов, складываются их проводимости. Практически параллельно соединяют элементы с одинаковыми э. д. с. и равными внутренними сопротивлениями.

Допустим, что электрическая цепь состоит из *n* одинаковых элементов. Пусть E и r — э. д. с. и внутреннее сопротивление одного элемента. Сопротивление внешней цепи пусть будет R. Напишем выражение для тока в цепи такой батареи при последовательном и параллельном соединениях элементов.

При последовательном соединении элементов э. д. с. батареи будет равна nE, внутреннее сопротивление батареи nr и общее

сопротивление цепи окажется равным $R+nr$. По закону Ома ток I в такой цепи определится по формуле:

$$I=\frac{nE}{R+nr}.$$

В случае же параллельного соединения элементов э. д. с. батареи будет равна э. д. с. одного элемента E, внутреннее сопротивление $\frac{r}{n}$ и общее сопротивление цепи станет равным $R+\frac{r}{n}$. Ток в такой цепи определится по формуле:

$$I=\frac{E}{R+\frac{r}{n}}.$$

Упражнение 11.

Батарея из двух элементов Лекланше питает внешнюю цепь, сопротивление которой 2 *ома*, э. д. с. элемента 1,45 *в*, внутреннее сопротивление 0,5 *ома*.

а) Рассчитайте ток, протекающий по данной цепи при последовательном и параллельном соединении элементов.

б) Исследуйте, при каком соотношении между внутренним сопротивлением элемента и внешним сопротивлением цепи для получения наибольшего тока выгоднее соединять эти элементы последовательно и при каком параллельно.

54. Работа и мощность постоянного тока. Во всякой замкнутой цепи обязательно имеет место двойное превращение энергии. В источнике тока происходит превращение какого-нибудь вида энергии (например, в генераторе механической энергии) в электрическую энергию; в цепи же тока электрическая энергия снова превращается в эквивалентное количество энергии другого вида. Мерой превращения в цепи тока электрической энергии в другие виды энергии является величина работы тока.

Но мы уже знаем, что работа тока есть работа электрических сил поля, перемещающих заряды; поэтому нам легко её подсчитать.

Работа переноса электрического заряда в электрическом поле оценивается произведением величины перенесённого заряда на величину разности потенциалов между начальной и конечной точками переноса, т. е. на величину напряжения:

$$A=qU.$$

Очевидно, что это соотношение может быть применимо и для оценки работы тока. О величине заряда, протекшего в цепи, мы можем судить по току, текущему в цепи, и времени его протекания, так как $q=It$.

Используя это соотношение, мы получаем формулу, выражающую величину работы тока на участке цепи с напряжением U:

$$A=UIt. \qquad (1)$$

Если измерять ток в амперах, напряжение в вольтах и время в секундах, то работа будет измеряться в джоулях (сокращённо *дж*):

1 джоуль = 1 ампер × 1 вольт × 1 секунду.

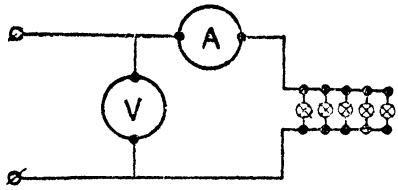


Рис. 83. Схема включения приборов для измерения мощности лампочек накаливания.

Вопрос о подсчёте величины работы тока на данном участке совершенно не связан с вопросом о том, в какой вид энергии превратится на данном участке электрическая энергия. Эта работа является мерой энергии электрического тока, превращённой на данном участке цепи в другие виды.

Зная, что мощность $P=\frac{A}{t}$, можно получить формулу для расчёта мощности электрического тока на участке цепи:

$$P=UI.$$

Мощность измеряется ваттами (*вт*): 1 ватт $=\frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ секунда}}$, или

1 ватт = 1 вольт × 1 ампер.

Измерение мощности в цепях постоянного тока может быть произведено при помощи амперметра и вольтметра. На рисунке 83 показана схема включения амперметра и вольтметра для измерения мощности лампочек накаливания.

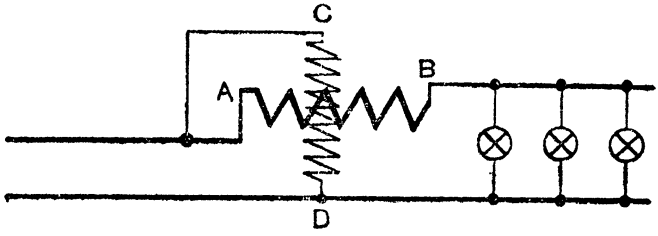


Рис. 84а. Схема включения электродинамического ваттметра.

Мощность в цепи постоянного тока можно измерить также при помощи специального измерительного прибора — ваттметра. В устройстве этого прибора сочетаются принципы амперметра и вольтметра. На рисунке 84а показана схема включения так называемого электродинамического ваттметра. В этом ваттметре неподвижная (токовая) катушка *AB* включается последовательно с лампочками, а подвижная катушка *CD* (катушка напряжения) включается параллельно лампочкам.

На рисунке 84б показано включение приборов для измерения мощности в цепи. Показания ваттметра могут быть проверены на основе показаний амперметра и вольтметра.

Для измерения работы тока, или, что всё равно, для измерения израсходованной энергии, пользуются специальными прибо-

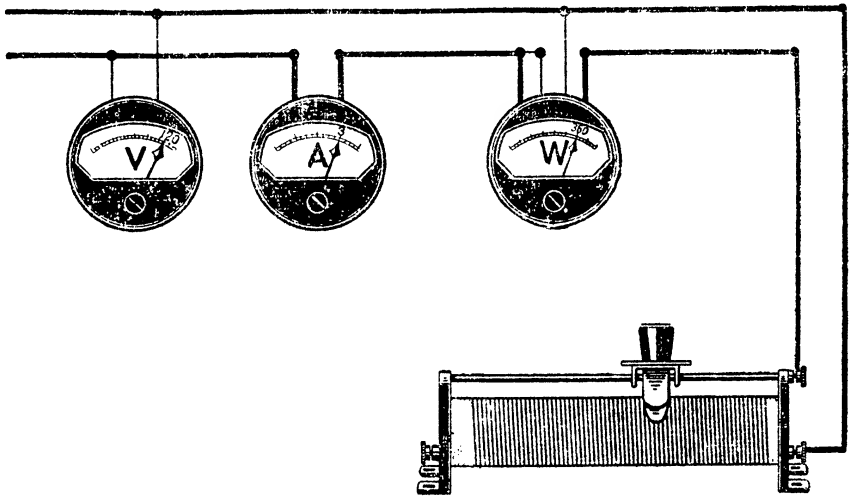


Рис. 84б. Включение приборов для проверки ваттметра.

рами, называемыми счётчиками (внешний вид одного из типов счётчиков дан на рисунке 85).

Счётчики измеряют работу тока в гектоватт-часах (*гвт · ч*) или киловатт-часах (*квт · ч*), автоматически регистрируя её.

Единицы работы и энергии

1 ватт-секунда = 1 *дж*
1 ватт-час = 3600 *дж*
1 гектоватт-час = 360 000 *дж*
1 киловатт-час = 3 600 000 *дж*

Единицы мощности

1 ампер-вольт = 1 *вт*
1 гектоватт = 100 *вт*
1 киловатт = 1000 *вт*

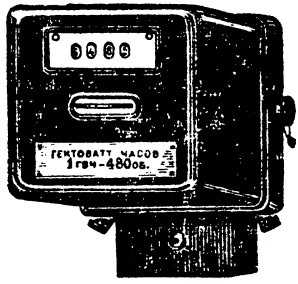


Рис. 85. Счётчик.

55. Закон Джоуля — Ленца. Проводник, по которому проходит ток, нагревается.

Русский учёный Ленц и английский учёный Джоуль, изучая на опыте тепловые действия тока, независимо один от другого установили закон, согласно которому ***количество теплоты,***

выделяющееся в проводнике, прямо пропорционально квадрату тока, проходящего по проводнику, сопротивлению проводника и времени, в течение которого поддерживается неизменный ток в проводнике.

Этот закон, носящий название закона Джоуля — Ленца, можно выразить формулой:

$$Q=kI^2Rt, \qquad (1)$$

где Q — количество выделившейся теплоты, I — ток, R — сопротивление проводника, t — время; величина k называется *тепловым эквивалентом работы.* Численное значение этой величины зависит от выбора единиц, в которых производятся измерения остальных величин, входящих в формулу (1).

Ленц Эмилий Христианович (1804—1865) — наш знаменитый физик. Он является одним из основоположников электротехники. С его именем связано открытие закона, определяющего направление индукционного тока, и закона, определяющего тепловые действия тока.

Если количество теплоты измерять в калориях, ток в амперах, сопротивление в омах, а время в секундах, то k численно равно 0,24. Это значит, что *ток в* 1 *а выделяет в проводнике, имеющем сопротивление* 1 *ом, за* 1 *секунду количество теплоты, равное* 0,24 *кал.* Таким образом, количество теплоты в калориях, выделяющееся в проводнике, может быть рассчитано по формуле:

$$Q=0{,}24I^2Rt.$$

В системе единиц СИ работа, энергия и количество теплоты измеряются одинаковыми единицами — джоулями. Поэтому коэффициент пропорциональности k в законе Джоуля — Ленца равен единице. В этой системе (которой мы будем пользоваться и дальше) формула закона Джоуля — Ленца имеет вид:

$$Q=I^2Rt. \qquad (2)$$

На рисунке 86 показана схема установки, с помощью которой можно на опыте проверить закон Джоуля — Ленца. По проволочной спиральке C, погружённой в жидкость, налитую в калориметр, пропускается некоторое время ток. Затем подсчитывается количество теплоты, выделившейся в калориметре. Сопротивление спирали известно заранее, ток измеряется амперметром и время секундомером.

Меняя ток в цепи и беря различные спирали, можно проверить закон Джоуля — Ленца.

На основании закона Ома

$$I=\frac{U}{R},$$

подставляя значение тока в формулу (2), получим новое выражение для закона Джоуля — Ленца:

$$Q=\frac{U^2}{R}t. \qquad (3)$$

Формулой $Q = I^2Rt$ удобно пользоваться при расчёте количества теплоты, которое выделяется в проводниках при последовательном соединении, так как в этом случае ток во всех проводниках один и тот же. Поэтому при последовательном соединении нескольких проводников в каждом из них выделяется количество теплоты, пропорциональное сопротивлению проводника. Если соединить, например, последовательно три проволочки одинаковых размеров — медную, железную и никелиновую, то наибольшее количество теплоты будет выделяться в никелиновой проволочке, так как удельное сопротивление её наибольшее, она сильнее и нагревается.

При параллельном соединении проводников ток в них различен, напряжение же на концах этих проводников одно и то же. Расчёт количества теплоты при таком соединении удобнее вести по формуле (3):

$$Q=\frac{U^2}{R}t.$$

Эта формула показывает, что при параллельном соединении в каждом проводнике выделяется количество теплоты, обратно пропорциональное сопротивлению проводника, т. е. прямо пропорциональное его проводимости.

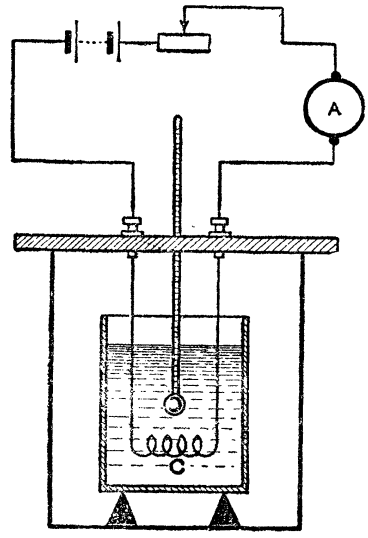


Рис. 86. Схема установки для проверки закона Джоуля — Ленца.

Если соединить три одинаковой толщины проволоки — медную, железную и никелиновую — параллельно между собой и пропустить через них ток, то наибольшее количество теплоты выделится в медной проволоке, она и нагреется сильнее остальных.

56. Выбор сечения проводов для электрической проводки. Согласно существующим техническим нормам, провода внутренней проводки, подводящие ток от магистральной линии к элек-

трическим приборам, должны выбираться так, чтобы падение напряжения в них не превышало 2% в осветительных и 4% в силовых сетях [1].

Кроме того, чтобы провода сильно не нагревались, ток в них не должен превышать некоторой допустимой величины (нормы).

Допустимые токи в изолированных проводах

Сечение в *мм*^{2}	Ток в амперах (норма)		
	Медь	Алюминий	Железо
1	6	6	—
1,5	10	8	—
2,5	15	10	6
4	20	15	8
6	25	20	10
10	31	25	15
16	43	35	25
25	75	60	—

Для очень коротких линий выбирают сечение проводов по данным таблицы, а затем проверяют величину падения напряжения.

Пусть, например, для обслуживания школьного физического кабинета требуется проводка длиной 15 *м*, а максимальная потребляемая в кабинете мощность равна 1,5 *квт* при напряжении 127 *в*. Потребляемый ток:

$$I=\frac{1500\ вт}{127\ в}\approx 12\ а;$$

для такого тока можно взять медный провод сечением 2,5 *мм*^{2}.

Сопротивление проводов (прямого и обратного) составит:

$$R=0{,}0175\,\frac{2\cdot 15}{2{,}5}=0{,}21\ ом,$$

а падение напряжения в проводах, рассчитанное по формуле $U=IR$, будет равно $12\cdot 0{,}21=2{,}5$ *в*, что вполне допустимо.

В случае длинной проводки расчёт проводов лучше производить исходя из допустимого падения напряжения с последующей проверкой по таблице получившегося значения тока.

Пусть, например, для освещения здания, отстоящего от магистральной линии на расстоянии 200 *м*, требуется ток в 10 *а* при напряжении 127 *в*. Допустимое падение напряжения 2%, т. е. 2,5 *в*.

Сопротивление проводов $R=\frac{2{,}5\ в}{10\ а}=0{,}25\ ом.$

[1] Силовыми называют сети, питающие электроэнергией электрические двигатели, мощные электрические печи и другие производственные установки и аппараты.

По формуле $R=\rho\frac{l}{S}$ находим сечение проводов:

$$S=\frac{0{,}0175\cdot 2\cdot 200}{0{,}25}=28\ мм^2.$$

Такое сечение допускает нагрузку свыше 75 *а*; таким образом, данное сечение вполне приемлемо.

Если бы сечение проводов, как и в первом примере, было выбрано по току, оно оказалось бы равным 1,5 *мм*². Перегрева проводов не было бы, но падение напряжения в проводах при этом сечении оказалось бы равным:

$$IR=10\cdot\frac{2\cdot 200\cdot 0{,}0175}{1{,}5}=46{,}6\ в;$$

что совершенно недопустимо. Следовательно, сечение проводов надо брать таким, чтобы падение напряжения на них не превышало нормы.

57. Электрическая сварка металлов. В 1882 г. русский инженер Н. Н. Бенардос изобрёл способ сварки металлов при помощи электрической дуги.

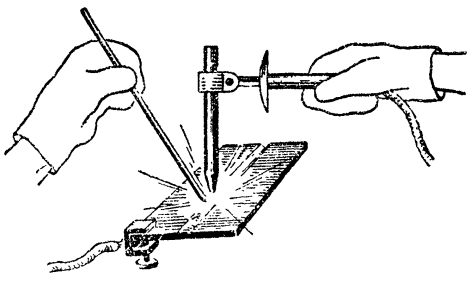


Рис. 87. Схема дуговой сварки по способу Бенардоса.

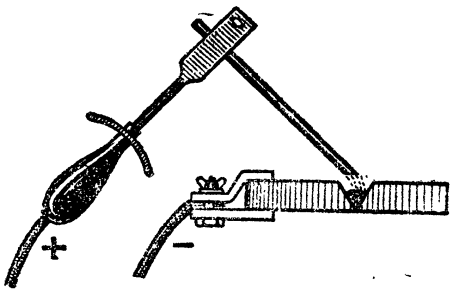


Рис. 88. Схема сварки по способу Славянова.

Схема дуговой сварки по способу Бенардоса изображена на рисунке 87. Свариваемые детали соединялись проводником с одним из полюсов электрической батареи. Таким же проводником соединялся с другим полюсом батареи угольный стержень. Между угольным электродом и металлическими деталями возникала электрическая дуга, которая расплавляла металл в местах стыка свариваемых деталей. В пламя дуги Бенардос помещал конец металлического стержня, так называемый присадочный металл. В электрической дуге этот стержень оплавлялся, и капли жидкого металла, стекая, заполняли место стыка свариваемых деталей. После застывания металла детали соединялись в одно целое.

Широкое применение получил способ электрической отливки, изобретённый в 1891 г. Н. Г. Славяновым. Этот способ заключается в наливании расплавленного электрическим током металла, служащего анодом, на поверхность свариваемой детали.

Схематически способ Славянова изображён на рисунке 88. Изобретения Бенардоса и Славянова нашли широкое применение в промышленности, особенно в мощной промышленности Советского Союза. Советскими инженерами и учёными способы дуговой сварки значительно усовершенствованы. Так, например, разработан и широко применяется на наших стройках способ электросварки под водой. Многие процессы электросварки автоматизированы.

Наряду с дуговой сваркой широкое применение в технике имеет способ «контактной сварки». При этом способе через свариваемые металлические детали пропускают сильный ток (рис. 89, *а*).

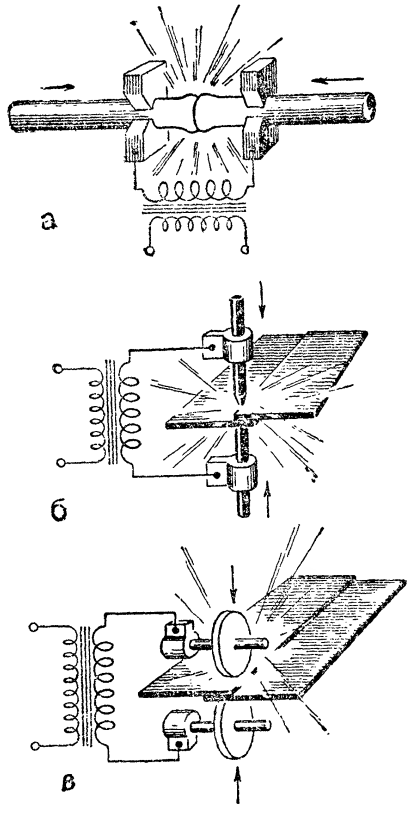


Рис. 89. Схема контактной сварки.

В месте соединения свариваемых деталей сопротивление цепи из-за плохого контакта наибольшее; при надлежащем токе здесь выделяется большое количество теплоты, вследствие чего детали размягчаются в месте их соприкосновения, и если в таком состоянии их прижать друг к другу, то они свариваются. Такой способ электрической сварки называется «контактной сваркой».

На рисунке 89, *б* изображена точечная контактная сварка, а на рисунке 89, *в* — роликовая сварка.

Способ «контактной электросварки» широко применяется для сваривания металлов с большим удельным сопротивлением (никель, тантал, молибден и др.).

58. Термоэлектрический ток. Если спаять концы двух металлических проволок, например сделанных из висмута и меди, и нагреть один из спаев, оставляя другой холодным, то в такой цепи возникает электрический ток.

Этот ток носит название термоэлектрического тока, а два соединённых разнородных проводника, дающих такой ток, называются термоэлементом или термопарой.

Возникающая в термопаре при нагревании одного из спаев э.д.с. называется электродвижущей силой термопары.

Величина э. д. с. термопары зависит от разности температур спаев, увеличиваясь с ростом разности температур.

Термопары можно изготовлять не только из висмута и меди, но и из других пар металлов.

Составим, например, термопару из железной и константановой проволоки. Для этого концы константановой проволоки *К* (рис. 90) плотно соединим с концами железных проволок *Ж*, а свободные концы последних присоединим к чувствительному гальванометру *G*.

Если нагревать один и тот же спай последовательно — рукой, горячей водой, горящей спичкой или горелкой, а другой спай поддерживать при постоянной температуре, то можно заметить, что с увеличением разности температур спаев увеличивается ток, а следовательно, увеличивается и э. д. с. термопары.

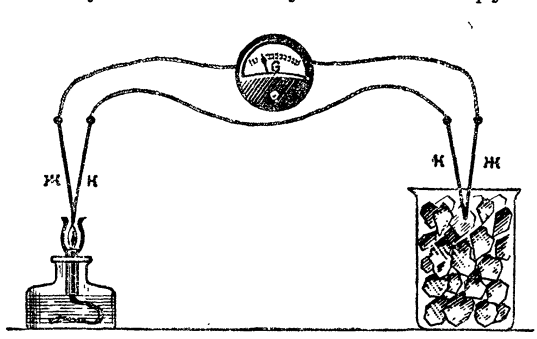


Рис. 90. Установка для измерения термоэлектродвижущей силы.

Э. д. с. термопары зависит не только от разности температур спаев, но и от рода металлов, входящих в термопару.

Термоэлектродвижущие силы некоторых пар металлов при температурах спаев 0° и 100° С имеют следующие значения:

Термопара	Э. д. с. в вольтах
Висмут — сурьма	0,011
Константан — железо	0,0053
Медь — железо	0,001
Медь — константан	0,0047
Платина — платинородий	0,001
Хромель — алюмель [1]	0,042
Хромель — копель [2]	0,062

Термоэлектродвижущие силы различных термопар приближённо можно считать пропорциональными разности температур нагретого и холодного спаев. Однако это справедливо только для небольших разностей температур. Для больших разностей температур эта зависимость значительно сложнее.

Зависимость величины э. д. с. термопары от разности температур спаев даёт возможность использовать термопары для измерения как очень малых, так и очень больших разностей температур, причём с очень высокой степенью точности, зависящей от чувствительности гальванометра и термопары. На рисунке 91 дана принципиальная схема измерения температур с помощью термопары. Контакт термопары (*1*), закрытый защитной оболочкой, помещается в тело, температура которого измеряется (на-

[1] Хромель — сплав, содержащий около 90% Ni+10% Cr.
Алюмель — сплав, содержащий 95% Ni и остальное Al, Mn, Si.

[2] Копель — сплав: 43,5% Ni и 56,5% Cu.

пример, в печь). К свободным концам проволок (*2*) приключается гальванометр (*3*), градуированный на градусы.

Для увеличения термоэлектродвижущей силы соединяют несколько термопар в батарею (рис. 92). Термобатареи, изготовленные из специальных термопар, применяются в настоящее время в качестве источников тока для питания радиоприёмников. Такая термобатарея может нагреваться от обычной керосиновой лампы.

Работа термопар основана на том, что число свободных электронов в единице объёма — так называемая плотность электронного газа в различных металлах различна. При соприкосновении двух таких металлов электроны перемещаются (диффундируют) из того металла *A* (рис. 93), где плотность электронного газа больше, в металл *B*, в котором плотность электронного газа меньше. Это перемещение прекращается при установлении между металлами некоторой определённой разности потенциалов $\varphi_A - \varphi_B$ (рис. 93).

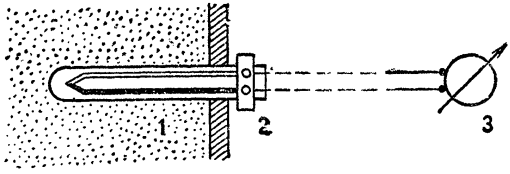


Рис. 91. Применение термопары для измерения температуры.

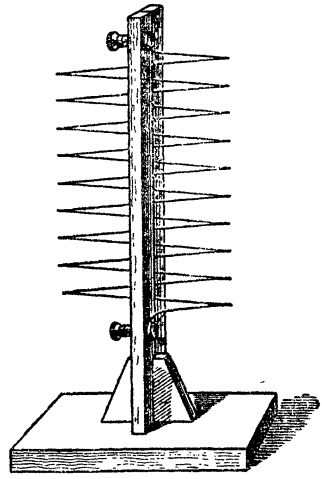


Рис. 92. Термобатарея.

Если из двух металлов составить замкнутую цепь, то при одинаковой температуре обоих контактов металлов тока в этой цепи не будет, так как разности потенциалов в одном и другом контакте будут иметь одну и ту же величину, но противоположные знаки (рис. 94). Если же контакты металлов будут иметь неодинаковую

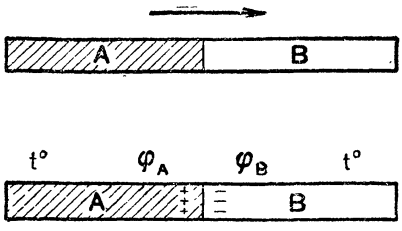


Рис. 93. В месте контакта двух металлов происходит диффузия электронов.

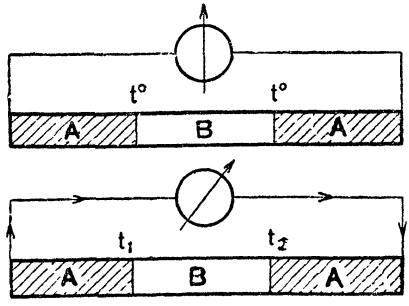


Рис. 94. Возникновение термоэлектродвижущей силы.

температуру, то алгебраическая сумма разностей потенциалов контактов не будет равна нулю. В этом случае в цепи будет существовать электродвижущая сила, называемая термоэлектродвижущей силой, которая и создаёт в цепи ток (рис. 94).

Упражнение 12.

1. Почему при соединении проводов их не только скручивают вместе, но и спаивают?
2. Две проволоки — никелиновая и алюминиевая — одинакового сечения и длины включены последовательно в одну и ту же цепь. В какой из них выделится больше энергии? Во сколько раз?
3. Две проволоки — железная и медная — одинакового сечения и длины включены параллельно в цепь. В какой из них выделится больше энергии? Во сколько раз?
4. Две проволоки — никелиновая длиной 1 *м* и сечением 2 *мм*^{2} и железная длиной 2 *м* и сечением 0,5 *мм*^{2} — включены последовательно в одну и ту же цепь. В какой из проволок выделится больше энергии? Во сколько раз?
5. Как объяснить, что при прохождении тока через провода и нить электрической лампочки нить накаливается добела, в то время как провода почти не нагреваются, между тем ток в проводнике и нити лампочки одинаковый?
6. Почему, несмотря на непрерывное выделение энергии в электрической печи или в утюге, обмотка последних не перегорает?
7. Если нагревательный прибор (кипятильник) вынуть из воды, не выключив его из сети, то он быстро перегорает. Почему?

59. Электролиз. Первый закон Фарадея. Мы видели, что в электролите всегда имеется определённое количество ионов обоих знаков, получившихся в результате взаимодействия молекул растворённого вещества с растворителем. Когда в электролите возникает электрическое поле, находящиеся в электролите ионы начинают двигаться к электродам. Положительные ионы устремляются к катоду, отрицательные — к аноду.

Дойдя до электродов, ионы отдают им свои заряды, превращаются в нейтральные атомы и отлагаются на электродах.

Чем больше ионов подойдёт к электродам, тем больше будет отложено на них вещества.

К этому заключению мы можем прийти и опытным путём.

Пропустим ток через раствор медного купороса и будем наблюдать за выделением меди на угольном катоде. Мы обнаружим, что вначале угольный катод покроется едва заметным слоем меди, затем по мере пропускания тока слой меди на катоде будет увеличиваться, а при длительном пропускании тока можно получить на угольном электроде значительной толщины слой меди, к которому легко припаять, например, медный провод.

Явление выделения вещества на электродах при прохождении через электролит тока называется электролизом.

Пропуская через разные электролиты различные токи и тщательно измеряя массу вещества, выделяющегося на электродах из каждого электролита, английский физик Фарадей в 1833—1834 гг. открыл два закона электролиза.

Первый закон Фарадея устанавливает зависимость между массой выделившегося вещества при электролизе и величиной заряда, протекшего через электролит. Закон этот формулируется следующим образом: ***масса вещества, выделившегося при электролизе, на каждом из электродов прямо пропорциональна величине заряда, протекшего через электролит:***

$$m = kq, \qquad (1)$$

Фарадей Майкл (1791—1867) — великий английский физик, сыграл выдающуюся роль в развитии учений об электромагнитных явлениях. Он открыл явление электромагнитной индукции, законы электролиза. Фарадей впервые ввёл представление об электрическом и магнитном полях. Ему принадлежат первые мысли о связи электрических, магнитных и световых явлений. Он сделал ряд открытий и в других областях физики; среди них особенно известен метод сжижения газов.

где m — масса выделившегося вещества, q — заряд.

Величина k называется электрохимическим эквивалентом вещества. Эта величина характерна для каждого вещества, выделяющегося при электролизе.

Если в формуле (1) принять $q = 1$ кулону, тогда $k = m$, т. е. *электрохимический эквивалент вещества численно равен массе вещества, выделившегося из электролита при прохождении заряда в один кулон.*

Выражая в формуле (1) заряд через ток I и время t, получим:

$$m = kIt. \qquad (2)$$

Первый закон Фарадея можно проверить на опыте следующим образом. Пропустим ток через электролиты A, B и C (рис. 95). Если все эти электролиты одинаковые, то количества выделенного вещества в A, B и C будут относиться, как токи I, I_1 и I_2. При этом количество вещества, выделенного в A, будет равно сумме количеств веществ, выделенных в B и C, так как ток $I = I_1 + I_2$.

60. Второй закон Фарадея. Второй закон Фарадея устанавливает зависимость электрохимического эквивалента от атомного веса вещества и его валентности и формулируется следующим образом: ***электрохимические эквиваленты веществ пропорциональны атомным весам и обратно пропорциональны их валентностям.***

Отношение атомного веса к валентности называется химическим эквивалентом вещества.

Введя эту величину, второй закон Фарадея можно сформулировать иначе: *электрохимические эквиваленты веществ пропорциональны их химическим эквивалентам.*

Пусть электрохимические эквиваленты нескольких разных веществ соответственно равны k_1 и k_2, k_3, ..., k_n, химические же эквиваленты тех же веществ x_1 и x_2, x_3, ..., x_n, тогда

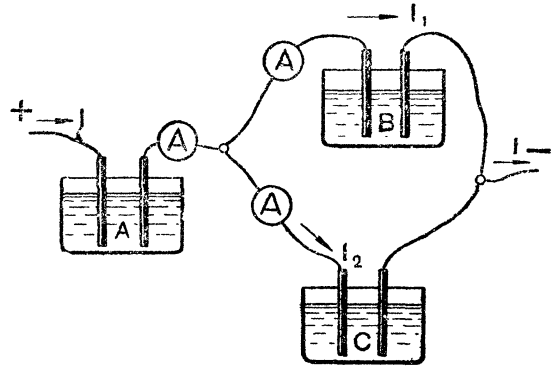


Рис. 95. Схема установки для проверки первого закона Фарадея.

$$\frac{k_1}{k_2}=\frac{x_1}{x_2}, \text{ или } \frac{k_1}{x_1}=\frac{k_2}{x_2}=\frac{k_3}{x_3}=\ldots=\frac{k_n}{x_n}. \quad (1)$$

Иначе говоря, *отношение величины электрохимического эквивалента вещества к величине химического эквивалента того же вещества есть величина постоянная, имеющая для всех веществ одно и то же значение:*

$$\frac{k}{x}=c. \quad (2)$$

То, что это отношение для всех веществ одинаково, легко проверить, воспользовавшись данными приведённой ниже таблицы.

Таблица электрохимических и химических эквивалентов веществ

Вещество	Атомный вес A	Валентность n	Химический эквивалент $x=\frac{A}{n}$	Электрохимический эквивалент $\frac{мг}{к}$
Серебро	107,9	1	107,9	1,118
Медь	63,6	2	31,8	0,328
Хлор	35,5	1	35,5	0,367
Водород	1,008	1	1,008	0,0104
Кислород	16	2	8	0,0828
Алюминий	27,1	3	9,03	0,094
Никель	58,7	2	29,35	0,304

Так, например,

$$\text{для Cl: } \frac{k_{Cl}}{x_{Cl}}=\frac{0,367}{35,5}=0,01036;$$

$$\text{» H: } \frac{k_{H}}{x_{H}}=\frac{0,0104}{1,008}=0,01036;$$

$$\text{» Cu: } \frac{k_{Cu}}{x_{Cu}}=\frac{0,328}{31,8}=0,01036;$$

$$\text{» Ag: } \frac{k_{Ag}}{x_{Ag}}=\frac{1,118}{107,9}=0,01036.$$

Таким образом, отношение $\frac{k}{x}$ является постоянным для всех веществ: $\frac{k}{x}=c=0,01036\ \frac{мг\text{-}экв}{к}=0,00001036\ \frac{г\text{-}экв}{к}$.

Величина c показывает, сколько грамм-эквивалентов вещества выделяется на электродах при прохождении через электролит электрического заряда, равного 1 кулону[1].

Второй закон Фарадея может быть выражен формулой:

$$k=cx. \tag{3}$$

Подставляя полученное выражение для k в первый закон Фарадея, можно оба закона объединить в одном выражении:

$$m=kq=cxq=cxIt, \tag{4}$$

где c — универсальная постоянная, равная $0,00001036\ \frac{г\text{-}экв}{к}$.

Формула (4) показывает, что, пропуская одинаковые токи в течение одного и того же промежутка времени через два различных электролита, мы выделим из обоих электролитов количества веществ, относящихся как химические эквиваленты этих веществ.

Так как $x=\frac{A}{n}$, то можно написать:

$$m=c\frac{A}{n}It,$$

т. е. ***масса вещества, выделяющегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна атомному весу вещества, току, времени и обратно пропорциональна валентности вещества.***

Второй закон Фарадея, так же как и первый, непосредственно вытекает из ионного характера тока в растворе.

Действительно, допустим, что мы имеем дело с электролизом двух каких-нибудь одновалентных веществ, например раствора NaCl и $AgNO_3$.

---

[1] *Грамм-эквивалентом простого вещества называют количество этого вещества в граммах, численно равное его химическому эквиваленту.*

При прохождении в этих растворах равных зарядов к соответствующим электродам подойдёт равное количество ионов, так как заряды ионов в обоих растворах имеют одну и ту же величину. Но при равном числе подошедших ионов весовое количество отложившихся веществ Na и Ag будет различно, так как различны веса самих атомов Na и Ag. Очевидно, по весу серебра будет выделено больше, чем натрия, во столько раз, во сколько раз атом серебра тяжелее атома натрия. Другими словами, количество отложившегося вещества пропорционально его атомному весу, что и утверждается вторым законом Фарадея. С другой стороны, при переносе зарядов ионами разной валентности количества ионов, переносящих один и тот же заряд, будут различны: чем больше валентность иона, т. е. чем больше заряд иона, тем меньшее число ионов потребуется для переноса данного заряда. Этим и объясняется то, что электрохимические эквиваленты обратно пропорциональны валентности вещества.

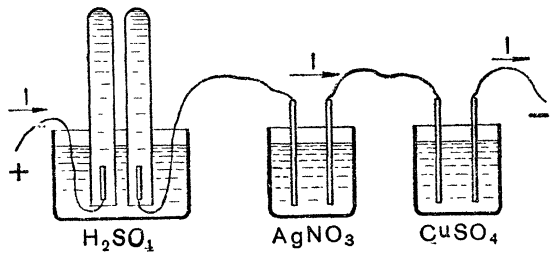


Рис. 96. Схема установки для проверки второго закона Фарадея.

На рисунке 96 изображена установка для проверки второго закона Фарадея. Ток, текущий через различные электролиты, одинаков, но массы веществ, выделяющихся на электродах, будут пропорциональны их химическим эквивалентам.

Упражнение 13.

1. Как объяснить, что раствор, содержащий ионы, остаётся электронейтральным?
2. Почему все разноимённые ионы в электролите не собираются под действием взаимного притяжения в нейтральные молекулы?

61. Число Фарадея. Подсчитаем, какой электрический заряд должен пройти через электролит, чтобы выделилось на электродах по одному грамм-эквиваленту данного вещества.

Для этого в формуле $m=cxq$ положим $m=x$; тогда получим, что величина заряда q, прошедшего через электролит, будет равна:

$$\frac{1}{c}\left(\frac{1}{c}=q\right), \text{ или } \frac{1}{0{,}00001036\ \frac{г\text{-}экв}{к}}=96\,500\ \frac{к}{г\text{-}экв}.$$

Таким образом, ***для выделения грамм-эквивалента любого вещества при электролизе необходимо прохождение через раствор одного и того же электрического заряда, равного 96 500 кулонам.***

Этот электрический заряд носит название числа Фарадея и обозначается буквой F:

$$F = 96\,500 \text{ кулонов.}$$

Грамм-атомом простого вещества называется количество этого вещества в граммах, численно равное его атомному весу. Так как химический эквивалент связан с атомным весом соотношением:

$$x = \frac{A}{n}, \text{ или } A = nx,$$

где A — атомный вес, n — валентность, то отсюда следует, что грамм-атом одновалентного вещества ($n=1$) равен его грамм-эквиваленту, грамм-атом двухвалентного вещества ($n=2$) вдвое больше его грамм-эквивалента и т. д. Поэтому, определяя заряд, необходимый для выделения грамм-атома одно-, двух-, трёх-, четырёх- и вообще n-валентного вещества, мы найдём, что соответствующие заряды равны: F, $2F$, $3F$, $4F$, вообще nF кулонов, т. е. в n раз больше, чем заряд, необходимый для выделения одного грамм-атома одновалентного вещества.

62. Заряд иона. Законы электролиза, установленные Фарадеем, явились первой опытной основой наших представлений о дискретности [1] электрических зарядов.

Из законов Фарадея следует, что при электролизе для выделения из электролита одного грамм-атома одновалентного вещества необходимо пропустить через электролит заряд в 96 500 кулонов. Такой заряд переносится всеми ионами, содержащимися в грамм-атоме, потому что выделившееся на электроде вещество первоначально находилось в растворе в виде ионов.

Зная число атомов в грамм-атоме вещества, можно найти заряд одного иона одновалентного вещества. Число атомов в грамм-атоме вещества было определено разнообразными способами; оно получило название числа Авогадро (N). Приближённо число Авогадро равно $N = 6 \cdot 10^{23}$. Частное от деления числа Фарадея на число Авогадро равно заряду q_0, переносимому при электролизе каждым ионом одновалентного вещества:

$$q_0 = \frac{F}{N}; \quad q_0 = \frac{96\,500}{6 \cdot 10^{23}} \text{ кулонов.}$$

Выразив заряд одновалентного иона в единицах СГСЭ, получим:

$$q_0 = \frac{96\,500 \cdot 3 \cdot 10^9}{6 \cdot 10^{23}}; \quad q_0 = \pm 4{,}8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. заряда СГСЭ.}$$

Величина q_0 представляет минимальный заряд, который может нести ион. Этот заряд равен заряду одновалентного иона. Полученная величина минимального заряда иона оказывается равной

[1] Дискретный (лат. дискретус) — прерывистый, состоящий из отдельных частей.

величине заряда электрона, найденной в опытах многих исследователей (§ 7).

Мы видели, что для выделения одного грамм-атома двух-, трёх- и вообще n-валентного вещества необходим заряд, равный $2F$, $3F$, вообще nF кулонов. Следовательно, заряд двух-, трёх- и вообще n-валентного иона соответственно равен $2q_0$, $3q_0$, ..., nq_0.

Многовалентные ионы несут заряды, в целое число раз большие заряда одновалентного иона.

Таким образом, *ионы электролитов несут заряды, которые являются целыми кратными некоторого минимального заряда.*

Этот вывод сыграл большую роль в развитии учения об электрических явлениях; он натолкнул на мысль о том, что существуют частички — носители минимального электрического заряда. Действительно, изучение электрических разрядов в газах привело к открытию электрона. В дальнейшем было установлено, что носителями электрических зарядов являются элементарные частицы — электроны, протоны и позитроны, каждая из которых обладает одинаковым по абсолютной величине зарядом, равным $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ед. СГСЭ. Протоны и позитроны несут положительный заряд, электроны же — отрицательный.

Все электрические заряды являются целыми кратными этой величины $q_0 = \pm 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ед. СГСЭ. Электрически заряженные частицы входят в состав атомов и молекул всех веществ, так что нейтральные (незаряженные) тела представляются такими лишь потому, что в них имеются равные количества зарядов противоположных знаков.

63. Примеры применения электролиза в технике. 1. Рафинирование меди. В современной электротехнике чистая медь находит широкое применение. Она является лучшим материалом для изготовления проводов. Присутствие же незначительных примесей в медном проводе значительно ухудшает свойства меди как проводника тока (§ 41). Очистка меди от всех примесей называется рафинированием меди; производится она на специальных заводах.

Огромные деревянные баки или бетонные чаны наполняются раствором медного купороса. В каждый из них опускают несколько соединённых параллельно медных катодов, сделанных из тонких пластинок химически чистой меди, и между ними — несколько анодов (толстых пластин из неочищенной меди, соединённых между собой параллельно). При прохождении тока на катоде отлагается чистая медь, выделяемая из медного купороса, тогда как анод растворяется и анодная пластинка делается всё тоньше и тоньше. Посторонние примеси, находящиеся на аноде, падают как осадок на дно. Когда катод нарастает до необходимых размеров, его вынимают из раствора; вместо него помещают новую тонкую медную пластинку, на место же израсходованной анодной пластинки ставят новую, вследствие чего процесс идёт не прекращаясь.

Процесс наращивания катода идёт сравнительно медленно; поэтому, чтобы получить катодную пластинку весом 80 *кГ*, как это обычно и имеет место на наших заводах, нужно непрерывно пропускать ток в течение двадцати — тридцати дней. Дело в том, что только при малой плотности тока, порядка 0,3 *а* на 1 *дм*^{2} поверхности электрода, на катоде выделяется чистая медь и посторонние примеси либо переходят в раствор (без отложения на катоде), либо выпадают на дно ванны в виде осадка.

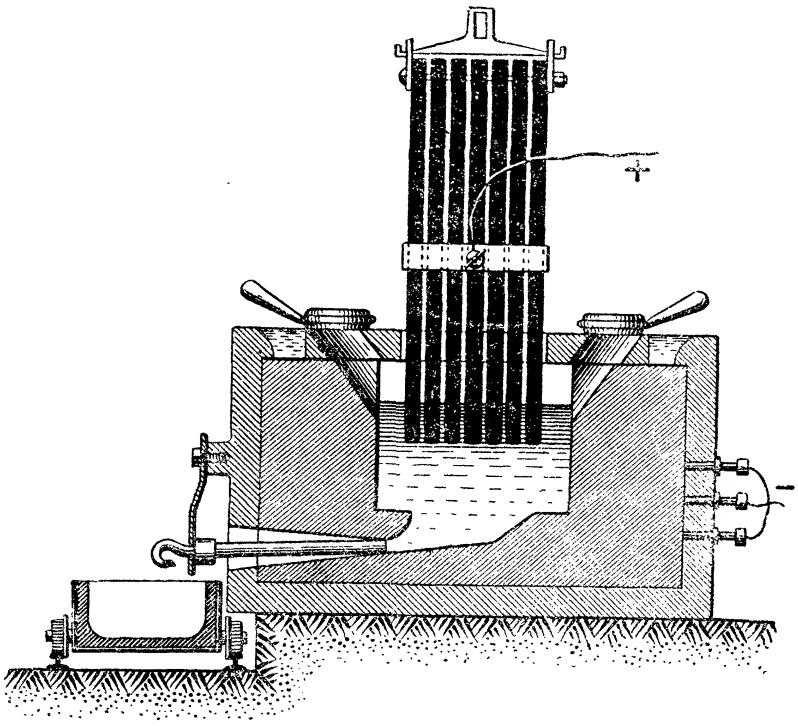


Рис. 97. Разрез электролитической печи для получения алюминия.

Интересно отметить, что в анодном осадке, в так называемом ш л а м е, содержится ряд очень ценных и редких металлов, среди которых имеются золото, платина и серебро.

Медь, полученная электролитическим способом, называется электролитной медью.

Бурно развивающаяся электротехническая промышленность нашего Союза требует огромного количества чистой меди. Чтобы удовлетворить потребность промышленности в меди, в Советском Союзе построено много мощных заводов.

2. Д о б ы в а н и е а л ю м и н и я. Несмотря на то что алюминий является одним из самых распространённых химических элементов, входящих в состав земной коры (алюминий содержит-

ся в любой глине), он позднее других элементов получил практическое применение. В 1881 г. алюминий был получен лабораторным путём, его стоимость была близка к стоимости золота. Сейчас же алюминий является одним из весьма распространённых металлов.

Промышленная добыча алюминия и его дешевизна оказались возможными лишь тогда, когда стали применять дешёвую электрическую энергию для его добычи.

Для электролиза окиси алюминия применяют электролизные ванны — электролизёры (рис. 97). Электролитом служит здесь раствор глинозёма (окись алюминия) в расплавленном криолите (фтористый алюминий с фтористым натрием).

В особые тигли всыпают указанные выше вещества. Сам тигель служит катодом. Анодом являются угольные стержни, вставленные в тигель. Пропуская ток через криолит, добиваются его расплавления за счёт той энергии, которую даёт сам ток. Для этого сначала угольные стержни опускают до соединения с тиглем. После того как криолит расплавится, угли поднимают. Ток пойдёт через расплавленную массу, и на катоде (дно и стенки тигля) станет выделяться чистый алюминий в жидком виде. Расплавленный алюминий более тяжёлый, чем его руда, опускается на дно, откуда его через особое отверстие выпускают в формы для отливки.

Для производства алюминия таким образом нужно иметь дешёвую электрическую энергию и хорошую алюминиевую руду. Такие условия имеются во многих местах Советского Союза.

По добыче алюминия Советский Союз уже сейчас занимает одно из первых мест в мире.

Кроме алюминия и меди, электролитическим путём в настоящее время добывают целый ряд металлов: магний, натрий, калий, кальций и др. В химической промышленности при помощи электрического тока добывают соду, хлор, хлористый кальций и др.

3. Гальваностегия. Поверхность металлических предметов, легко поддающихся окислению, часто покрывают металлами, трудно окисляющимися: никелем, серебром, цинком и др. Всем известны, например, никелированные вещи: самовары, чайники, коньки, ножи, вилки и т. д.

Электрический способ покрытия предметов неокисляющимися металлами носит название гальваностегии. Этот способ является самым дешёвым, удобным и быстрым.

Предмет, который желают покрыть, например, слоем никеля, тщательно очищают от грязи и следов жира, после чего погружают в электролитическую ванну (рис. 98). В ванну наливают аммиачный раствор двойной соли $(NH_4)_2SO_4NiSO_4 \cdot 6H_2O$. В качестве анода берут кусок никеля, а катодом служит сам предмет. Пропуская некоторое время ток, получают нужной толщины плотный слой никеля.

При серебрении и золочении употребляются растворы солей золота и серебра.

4. Гальванопластика. При помощи электрического тока можно получить металлические рельефные копии с различных рельефных узоров и предметов. Делается это следующим образом. Положим, что надо снять копию с рельефного рисунка, сделанного на деревянной доске. Ту часть доски, на которой имеется рисунок, покрывают тончайшим слоем графита, вследствие чего эта сторона становится проводником тока. Приготовленную доску опускают в раствор медного купороса и присоединяют к ней провод от отрицательного полюса источника. В качестве анода

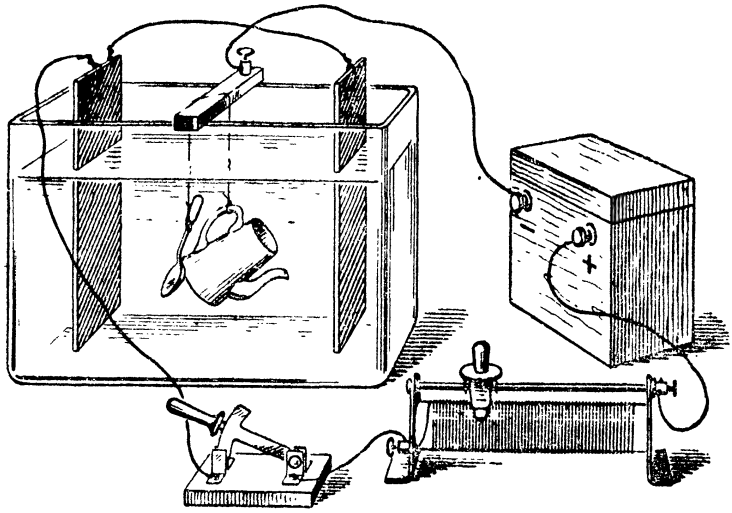


Рис. 98. Установка для электролитического покрытия предметов слоем металла.

помещают в раствор медного купороса медную пластинку. При пропускании тока медь, выделяющаяся при электролизе, будет отлагаться на доске. Когда образуется достаточно толстый слой отложившейся меди, её отделяют от доски, причём получают медный лист, на котором образуется точное негативное (обратное) изображение рисунка, бывшего на доске,— это так называемая матрица[1]. Все углубления, бывшие на доске, на медном негативе получаются выпуклыми, и наоборот. Если такое негативное изображение нужно перевести в точную копию оригинала, то приходится снимать копию с полученной матрицы, которая, являясь обратной копией негатива, вполне соответствует оригиналу.

Электролитическое осаждение металла на поверхность предмета для воспроизведения формы называется гальванопластикой. Гальванопластикой, например,

[1] Матрица (от лат. матрикс — матка) — углублённая форма для отливки наборных литер (букв), для изготовления набора в наборных машинах, для выдавливания (чеканки) монет, моделей, штемпелей и т. п.

пользуются для получения матриц, при помощи которых готовят граммофонные пластинки.

Гальванопластика была изобретена в 1836 г. нашим учёным Б. С. Якоби.

В письме в Петербургскую Академию наук от 5 сентября 1839 г., прилагая новый образец своей работы по гальванопластике, Якоби писал: *«Сие изобретение принадлежит России и не может быть оспоримо никаким другим изобретением вне оной».*

В 1840 г. открытие Якоби было приобретено русским правительством *«для всеобщего обнародования на пользу всей империи, а если угодно, то и для пользы всего света».*

Открытие Якоби быстро нашло широкое промышленное применение.

Гальванопластика применяется при изготовлении копий с барельефов, статуй, при изготовлении клише, при выпуске кредитных билетов и других бумаг и т. д.

В полиграфической промышленности гальванопластика применяется для изготовления гальванопластических копий с цинкографских клише и т. д. Это даёт возможность выпускать иллюстрированные издания в количестве сотен тысяч экземпляров.

Когда отмечалось пятидесятилетие гальванопластики, Русское техническое общество опубликовало заявление, в котором указывалось, что *«в истории образованности открытие гальванопластики должно быть приравнено по своему значению к открытию книгопечатания».*

Якоби Борис Семёнович (1801—1874) — русский академик, прославился открытием гальванопластики. Якоби внёс большой вклад в дело создания электродвигателей. Ему принадлежит изобретение первой практически пригодной конструкции электродвигателя и ряд других изобретений: буквопечатающие телеграфные аппараты, способ изоляции подземного провода и др.

64. Электрический ток в газе. Для металлических проводников и электролитов, как было установлено (§ 37), зависимость тока от напряжения имеет линейный характер, т. е. ток в таких проводниках возрастает пропорционально напряжению. Значительно сложнее законы проводимости в газах. Рассмотрим сначала электрический ток в газе, протекающий под действием внешнего ионизатора.

Газ, находящийся между двумя пластинами A и K, подвергается воздействию какого-нибудь ионизатора (рис. 99). Пластины соединены с положительным и отрицательным полюсами батареи элементов. Напряжение между пластинами можно менять путём изменения сопротивления реостата. Ток в цепи измеряется чувствительным гальванометром. Напряжение на полюсах батареи и,

следовательно, на пластинах A и K, образующих воздушный конденсатор, измеряется вольтметром. Чувствительность гальванометра должна быть весьма значительной, потому что даже при сильной ионизации, но при небольших напряжениях ток в цепи бывает мал.

Приложим к пластинам A и K небольшое напряжение и измерим ток. Будем постепенно увеличивать напряжение. Тогда мы увидим, что вначале ток будет возрастать почти пропорционально напряжению. При увеличении напряжения ток начинает возрастать всё медленнее, и, наконец, наступает момент, когда при дальнейшем увеличении напряжения ток перестанет изменяться.

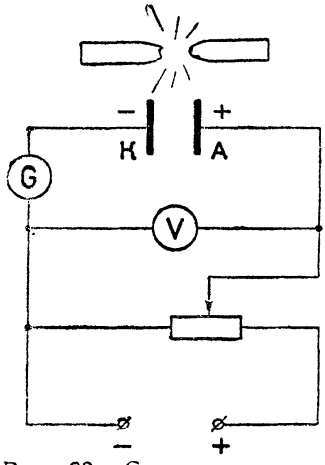


Рис. 99. Схема установки для изучения электропроводности газов.

Изменение тока в газе в зависимости от напряжения показано на рисунке 100. Максимальный ток, который уже не зависит от напряжения, называется током насыщения. На рисунке 100 величина его представлена отрезком I_n.

Описанный здесь опыт весьма важен, так как на основании его результатов можно составить себе представление о том, как происходит движение ионов и электронов в газе и какими явлениями это движение сопровождается.

Мы знаем, что между заряженными пластинами конденсатора существует электрическое поле, и если бы воздух между пластинами не содержал ионов, то конденсатор оставался бы заряженным неопределённо долгое время. Но благодаря действию ионизатора в воздушном промежутке конденсатора каждую секунду возникает определённое число положительных и отрицательных ионов. Что происходит с этими ионами?

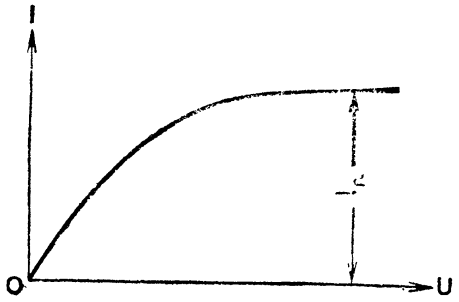


Рис. 100. Изменение тока в газе в зависимости от напряжения.

Ионы, несущие положительный заряд, приходят в движение по направлению к катоду, отрицательные же ионы и электроны направляются к аноду. В газе происходит движение ионов, подобное движению ионов в электролитической ванне, когда к электродам ванны приложено напряжение.

При движении ионы газа иногда сталкиваются друг с другом, и при столкновении двух разноимённо заряженных ионов происхо-

дит их нейтрализация. Следовательно, не все образующиеся под действием ионизаторов ионы доходят до электродов. Чем больше напряжение между электродами, тем быстрее движутся ионы и электроны и тем меньше времени они имеют для того, чтобы воссоединиться в молекулы.

Наконец, при некотором определённом напряжении на пластинах A и K ионы будут полностью переноситься на эти пластины, не успев ни разу столкнуться друг с другом. Дальнейшее увеличение напряжения не может увеличить числа переносимых ионов, так как оно определяется только действием ионизатора.

А так как ток создаётся движущимися ионами и электронами, то с повышением напряжения ток возрастать не будет. Мы достигли тока насыщения.

Ток насыщения зависит лишь от ионизирующей способности данного ионизатора и от объёма ионизирующего газа между электродами.

65. Ионизация газа через столкновения. Мы видели, что при достижении насыщения ток не изменяется с увеличением напряжения на пластинах конденсатора. Однако если напряжение значительно увеличится, то ток опять начнёт возрастать. Графически весь процесс изобразится кривой, показанной на рисунке 101. Если ток увеличился, то, следовательно, число ионов в воздухе по какой-то причине стало больше. Откуда взялись эти новые ионы? Дело в том, что электроны и ионы могут соударяться при своём движении и с нейтральными молекулами воздуха. Эти столкновения не имеют большого значения до тех пор, пока скорости их малы. При увеличении напряжения должен, однако, наступить такой момент, когда скорость, а следовательно, и кинетическая энергия иона возрастёт настолько, что при ударе о молекулу он сможет вырвать из неё электрон. При этом молекула ионизируется. Число ионов и электронов в газовом промежутке между электродами возрастёт, и ток увеличится.

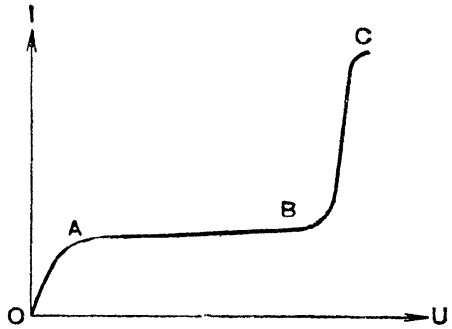


Рис. 101. Ионизация через столкновения ведёт к увеличению тока в газе.

Ток при ионизации через столкновения может возрастать весьма значительно; при сравнительно небольшом увеличении напряжения, начиная с некоторого предела, ток возрастает во много сотен тысяч раз.

Мы видели выше, что при достаточно высоком напряжении на электродах ионы и электроны разгоняются до такой скорости, что начинают своими ударами ионизировать молекулы воздуха.

Образовавшиеся при этом новые ионы и электроны приходят в движение по направлению к электродам и благодаря высокому напряжению сами приобретают кинетическую энергию, достаточную для ионизации молекул газа при столкновении с ними.

В этом случае для образования огромного числа ионов и электронов достаточно наличия ничтожного начального количества ионов в воздухе. Если бы в предыдущих опытах при наличии напряжения, достаточного для ионизации газа, ионизатор выключили, то ток в газе между электродами продолжался бы и без ионизатора. В таких случаях при разряде образуется «лавина» ионов и электронов.

Часто небольшой снежный ком при падении со снежной горы облепляется постепенно снегом и, летя к подножию горы, превращается в огромный снежный обвал, производящий сильные разрушения. Подобная «лавина» ионов образуется и при электрическом разряде в воздухе.

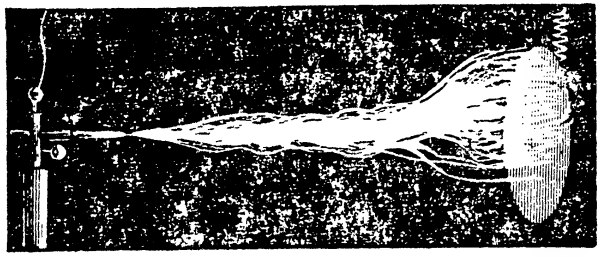


Рис. 102. Искровой разряд.

Надо отметить, что при образовании лавинного разряда роль положительных ионов и электронов далеко не одинакова. Значительно большим ионизирующим действием обладают электроны; ионизирующее действие положительных ионов имеет второстепенное значение в образовании лавинного разряда.

В воздухе при обычных условиях всегда содержится некоторое, очень небольшое число ионов. Это количество ионов столь мало, что заметной проводимости воздуху не сообщает, но вместе с тем оно обусловливает возможность возникновения в воздухе, при наличии достаточно большой напряжённости поля, лавинного разряда.

66. Различные виды разрядов в газах. Электрический ток в газах сопровождается рядом своеобразных явлений, резко отличающих его от тока в твёрдых проводниках и в электролитах. К числу таких явлений относятся разнообразные виды свечения газа при разряде — от слабого, еле заметного свечения проводов высокого напряжения до ослепительно яркого света электрической дуги и грандиозных вспышек молнии.

Разряды в газах сопровождаются и звуковыми явлениями; таковы, например, шипение коронного разряда, треск искр и мощные раскаты грома.

Наконец, при газовом разряде можно наблюдать и специфические химические реакции, не имеющие места при обычных условиях: образование окислов азота и циана в воздухе, образование молекул в одноатомных газах и др.

Из разнообразных видов разрядов, происходящих в газах, находящихся в нормальных условиях, мы рассмотрим искру и электрическую дугу.

1. Искра. Соединим два изолированных электрода с полюсами источника высокого напряжения.

При определённом напряжении на электродах мы будем наблюдать между ними искру (рис. 102). Искровой разряд сопровождается характерным треском и ослепительным сиянием. В воздухе образуется при этом некоторое количество озона. Подобного рода разряд имеет место при перекрытии гирлянды изоляторов на линиях высокого напряжения (рис. 103).

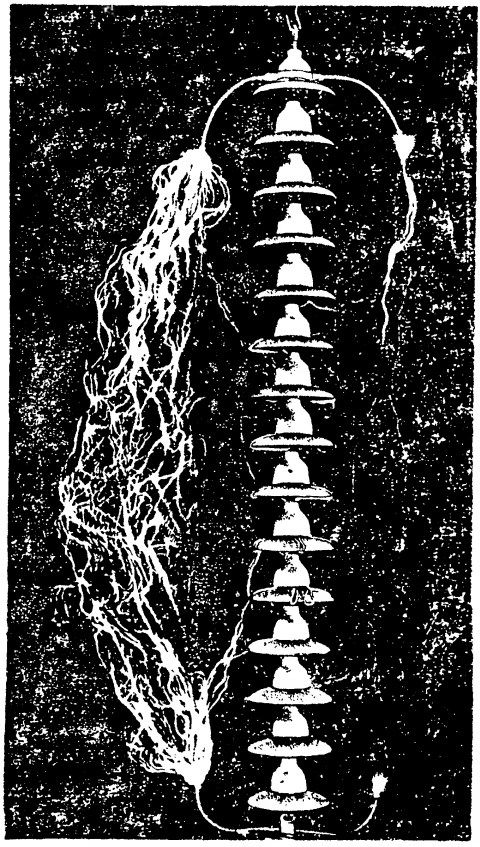


Рис. 103. Перекрытие гирлянды изоляторов.

Наблюдая искру, мы замечаем, что она имеет непостоянную форму и часто состоит из целого пучка искр. Если рассматривать искровой разряд во вращающемся зеркале или фотографировать при помощи быстро движущейся фотокамеры, то можно обнаружить, что искра не представляет постоянно текущего тока в газе, а имеет прерывистый характер. Возникшая искра быстро гаснет, на её месте образуется вторая, которая опять быстро прекращается и заменяется новой.

Кроме искровых разрядов в газе, могут происходить разряды внутри твёрдых и жидких диэлектриков. Эти разряды носят название пробоя. Пробой в диэлектрике наступает тогда, когда напряжённость поля в нём достигнет определённой для данного диэлектрика величины.

Величина этой напряжённости характеризует так называемую электрическую прочность диэлектрика.

При обычных условиях давления и температуры воздух пробивается при напряжённости поля около 30 000 $\frac{в}{см}$, или 3000 $\frac{в}{мм}$.

2. Молния. В природе мощные искровые разряды мы наблюдаем в виде молнии.

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землёй или между облаками. Это явление, как на это указывал ещё М. В. Ломоносов, связано с процессами конденсации влаги, содержащейся в воздухе, и с восходящими токами воздуха.

При наличии восходящих токов взвешенные в воздухе капельки воды разбиваются и при этом электризуются; мелкие капельки электризуются отрицательно, более крупные положительно. При большом скоплении таких капель могут возникнуть сильные электрические поля.

Если напряжённость электрического поля достигает значения, достаточного для пробоя воздуха, то происходит искровой разряд в виде молнии. Длина молнии может достигать 50 *км* и ток разряда до 10—12 тыс. ампер. По ориентировочным подсчётам

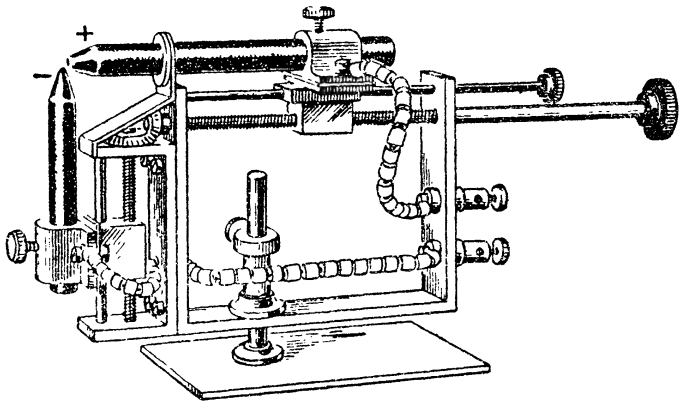


Рис. 104. Установка для получения электрической дуги.

напряжение, при котором происходит разряд в виде молнии, иногда превышает 150 млн. вольт.

Как всякий искровой разряд, молния прекращается, если напряжённость поля упадёт до величины, меньшей, чем та, при которой происходит пробой воздуха. Продолжительность молнии колеблется от 0,001 до 0,02 *сек*. Несмотря на столь незначительный промежуток времени, энергия таких разрядов значительна. Мы видим большое сходство по форме между искрой и молнией. Тождество молнии и искры доказал американский учёный Франклин в 1752 г. опытами с воздушным змеем.

Исследование происхождения и характера грозовых разрядов представляет собой довольно сложную научную проблему, изучению которой в Советском Союзе уделяется большое внимание.

3. Электрическая дуга. Весьма важной в практическом отношении разновидностью разряда является электрическая дуга.

Для получения электрической дуги применяются два угольных стержня, концы которых располагают вблизи друг друга (рис. 104).

Приложив к углям напряжение в 40—50 *в*, концы их приводят сначала в соприкосновение, а затем снова разводят на небольшое расстояние; при этом между концами углей вспыхивает ослепительное сияние.

Рассматривая это сияние через тёмное стекло, можно увидеть, что свет преимущественно исходит от концов углей; в промежутке между ними образуется собственно «дуга», т. е. яркая изогнутая полоска. Свет самой дуги слабее, чем свет, исходящий от концов углей. На анодном угле образуется небольшое углубление — кратер (рис. 105). Температура углей весьма высока; наиболее высокую температуру имеет кратер положительного угля (до 3900° С); температура катода ниже (около 2500° С). Благодаря высокой температуре происходит сгорание углей, причём анод сгорает быстрее.

На рисунке 104 изображена установка (регулятор) для получения электрической дуги между двумя углями.

Рис. 105. Фотография электрической дуги.

Электрическая дуга была открыта в 1802 г. знаменитым русским физиком В. В. Петровым. Открытие Петрова несправедливо долгое время приписывалось англичанину Дэви, который наблюдал электрическую дугу спустя десять лет (в 1812 г.) после того, как она была описана Петровым.

Применения электрической дуги весьма разнообразны. В качестве источника света электрическая дуга применяется в проекционных аппаратах, при киносъёмках, в прожекторах, маяках и других устройствах.

Благодаря высокой температуре в дуге происходят разнообразные химические реакции. Например, азот окисляется, образуя окислы, из которых получается азотная кислота. Подобный дуговой способ получения окислов азота прямо из воздуха широко применяется в технике.

При помощи электрической дуги можно плавить металлы и получать различные сплавы, что впервые показал В. В. Петров.

Высокие сорта стали в настоящее время получают путём обработки обычной стали в специальных электрических печах.

Возможность точно регулировать температуру печи с добавлением в сплав различных веществ позволяет получить сталь любого состава. В Советском Союзе получение стали электрическим способом сделалось возможным после того, как были построены мощные электростанции и получена дешёвая электрическая энергия.

Применение электрического тока для выплавки стали значительно удешевило производство этого важнейшего материала и повысило его качество.

Электрическая дуга образуется при размыкании сильных токов. Например, в городах иногда можно видеть ослепительную вспышку при случайных размыканиях трамвайного провода и бугеля.

На электростанциях для гашения дуги, возникающей при размыканиях цепей, приходится применять специальные выключатели, в которых разрыв цепи происходит в масле; масло гасит дугу.

В отличие от искры дуга представляет непрерывно длящийся разряд, который сопровождается пламенем. Так как этот разряд может происходить при сравнительно небольших напряжениях (порядка 40—50 *в*), а ток может быть, напротив, весьма велик, то ясно, что этот ток обусловлен не лавиной ионов, а имеет иное происхождение.

Работы советского физика В. Ф. Миткевича показали, что главную роль в этом разряде играет поток электронов, идущий от отрицательного электрода. Сильно раскалённый конец отрицательного угля испускает огромное количество электронов, которые, ионизируя газ, образуют ток в промежутке между углями. Пока температура катода достаточно высока, этот ток продолжается. Если катод охладить, то дуга погаснет.

67. Свеча Яблочкова. В 1876 г. талантливый русский инженер П. Н. Яблочков изобрёл «электрическую свечу», получившую название «русский свет».

Яблочков Павел Николаевич (1847—1891) — знаменитый русский электротехник, изобрёл в 1876 г. электрическую свечу, названную «свечой Яблочкова».

Свеча Яблочкова совершила подлинный переворот в технике электрического освещения.

Значительны заслуги П. Н. Яблочкова и в разработке конструкций генераторов постоянного тока, а также в создании гальванических элементов и аккумуляторов. В частности, он построил элемент, в котором в качестве источника тока непосредственно использовалась химическая реакция горения.

Свеча Яблочкова состояла из двух угольных стержней *A* и *B* (рис. 106), расположенных параллельно и разделённых слоем фарфоровой глины *E*. Верхние концы углей соединялись тонкой угольной или металлической полоской *C*. При замыкании цепи тока полоска сгорала и на вершине углей появлялась электрическая дуга.

Вследствие высокой температуры изоляционный слой *E* испарялся и угли постепенно равномерно сгорали. На смену свече Яблочкова пришёл более совершенный вид электрического освещения — лампочка накаливания, изобретённая русским инженером А. Н. Лодыгиным.

68. Применение электрической искры при обработке металлов. Рассматривая поверхность металлических электродов, между которыми проскакивали искры, можно обнаружить, что на аноде образуется углубление, а на катоде — нарост (рис. 107). Явление разрушения металла искрой называется электрической эрозией. Чем она вызывается? При проскакивании искры в воздушном промежутке между катодом и анодом возникает «электронная лавина», которая обрушивается на анод и нагревает ту часть его поверхности, на которую она обрушивается, до очень высокой температуры.

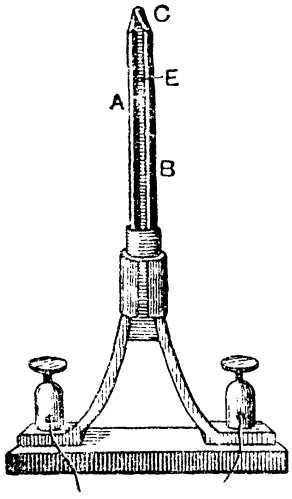


Рис. 106. Свеча Яблочкова.

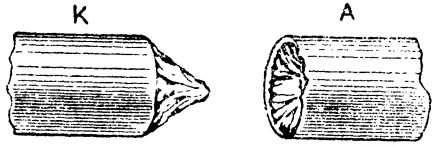


Рис. 107. Электрическая эрозия.

Металл анода в этом месте плавится и даже частично превращается в пар. Процесс этот происходит чрезвычайно быстро. Пары металла, расширяясь, выбрасывают с поверхности анода расплавленный металл, который попадает на катод, оседает на нём и затвердевает. В результате этого процесса на аноде образуется углубление, а на катоде — нарост.

Эрозия анода и катода происходит во всех тех случаях, когда образуется искра: в рубильниках, в контактах выключателей и различных реле. Во всех подобных случаях эрозия представляет собой вредное явление.

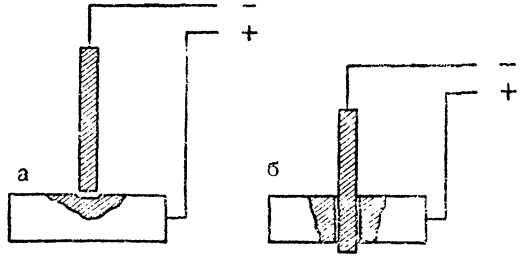


Рис. 108—109. Схема обработки металла с помощью электрической искры.

Советские учёные Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко поставили перед собой задачу использовать электрическую эрозию для обработки металлов.

Если деталь, в которой надо изготовить отверстие, сделать анодом и подвести к ней катод так, чтобы между ними проскакивали

искры, то в результате эрозии в детали начнёт образовываться углубление (рис. 108), которое в конце концов превратится в сквозное отверстие (рис. 109). Такой опыт полностью себя оправдал. Оказалось, что электрические искры проделывают в деталях отверстия не хуже свёрл. И что замечательно,— твёрдость металла для электрических искр не имеет никакого значения. С помощью электрической искры можно сделать отверстие в любом металле, как бы твёрд он ни был.

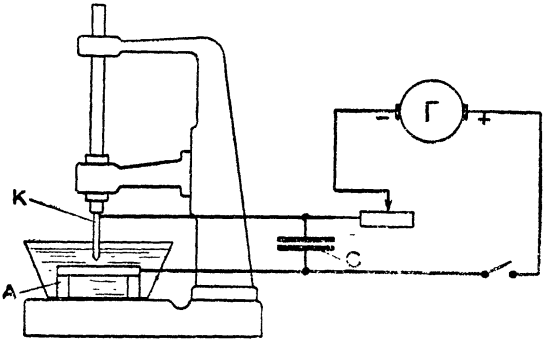


Рис. 110 Схема устройства станка для получения отверстий в металле искровым методом.

При проскакивании искры, как уже указывалось, на катоде образуется нарост. Это очень нежелательное явление, так как он искажает форму катода и делает невозможным получить в детали отверстие нужной формы и размера. Б. Р. и Н. И. Лазаренко удачно решили и эту проблему.

Они установили, что если между изделием (анодом) и катодом будет не воздух, а какая-нибудь непроводящая ток жидкость (керосин, масло), то нароста на катоде получаться не будет. Вырванный из анода металл останется в жидкости, не долетев до катода.

На рисунке 110 показана схема устройства станка для получения отверстий в металле искровым методом. Анодом здесь является изделие *А*, стержень *К* — катодом. Источником постоянного тока служит генератор *Г*. Конденсатор *С*, включённый в цепь, препятствует искре превратиться в дугу.

Когда катод *К* приблизится к изделию (не касаясь ещё его), между ними проскочит искра, произойдёт эрозия изделия. Катод немного поднимают, затем снова опускают, вновь проскакивает искра; углубление в изделии увеличивается и т. д.

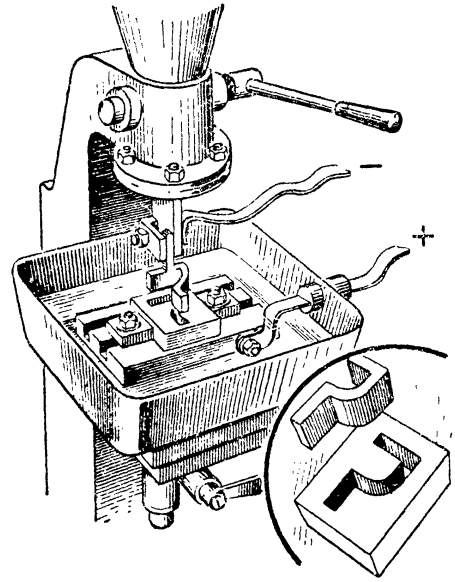


Рис. 111. Главная часть станка для искровой обработки изделий. Справа изображён профиль электрода.

Так будет продолжаться до тех пор, пока в изделии не образуется сквозное отверстие.

Колебания катода вверх и вниз осуществляются при помощи особого устройства, не показанного на схеме.

Электрод, которым производится электроискровая пробивка отверстий, должен иметь профиль, подобный профилю пробиваемого отверстия (рис. 111).

Электроды делаются из латуни, т. е. из довольно мягкого материала, и с помощью таких электродов можно пробить отверстия в закалённой стали или даже в твёрдом сплаве.

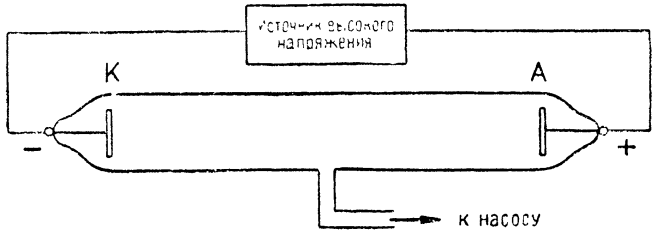


Рис. 112. Схема установки для наблюдения тока в разрежённом газе.

Электроискровая обработка металла применяется также при изготовлении различных штампов, для резки металлов и для заточки инструмента.

69. Прохождение тока через разрежённые газы. Выяснению природы носителей электрических зарядов в проводниках во многом способствовало изучение явлений, сопровождающих электрический ток в газах при пониженном давлении, т. е. в разрежённых газах. Это изучение началось в науке во второй половине XIX в.

Электрический ток, проходя через разрежённый газ, возбуждает свечение его. Газ при этом не накаливается, но светится, оставаясь холодным.

Свечение это, в зависимости от рода газа, от степени разрежения его, величины приложенного напряжения, может быть самым разнообразным.

Явления, возникающие в газе при прохождении через него тока, легко наблюдать на установке, схема которой дана на рисунке 112. На этом рисунке изображена длинная стеклянная трубка. *A* и *K* — алюминиевые электроды, вставленные в трубку. Контактные проволочки, с помощью которых электроды присоединяются к источнику высокого напряжения (в несколько тысяч вольт), впаяны в стекло трубки. Через отросток воздух из трубки откачивается насосом.

Пока давление воздуха в трубке равно атмосферному, тока в трубке нет.

Но если мы постепенно будем выкачивать воздух из трубки, то ток скоро появится, что можно обнаружить по свечению воздуха.

При небольшом разрежении воздуха (порядка 100 *мм рт. ст.*) между электродами появляется разряд в виде розовой светящейся змейки. По мере дальнейшего выкачивания воздуха розовая змейка непрерывно утолщается и постепенно заполняет своим светом всё поперечное сечение трубки. При давлении порядка 10 *мм* конец этой змейки отделяется от катода. Наконец, при давлении 1—2 *мм* разряд состоит в основном из двух частей: 1) несветящейся, непосредственно прилегающей к катоду, которая получила название катодного тёмного пространства, и 2) светящегося столба газа, заполняющего всю остальную часть трубки, вплоть до анода. Эта часть разряда называется положительным светящимся столбом (рис. 113). Иногда этот столб распадается на отдельные слои, разделённые тёмными промежутками.

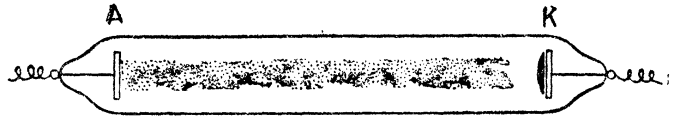


Рис. 113. Тлеющий разряд.

Рассмотренная нами форма разряда называется тлеющим разрядом. Трубки с тлеющим разрядом находят практическое применение как источники света в так называемых газосветных лампах. Газосветные лампы в настоящее время широко применяются для освещения витрин в магазинах, реклам и т. д. Особый вид газосветных ламп применяется и для целей освещения, подробнее об этом будет изложено дальше (§ 189). Цвет свечения зависит от рода газа. Неон, например, светится оранжево-красным светом, трубки с аргоном дают синевато-зелёное свечение и т. д.

70. Катодные лучи. При уменьшении давления газа в трубке положительный светящийся столб укорачивается, а катодное тёмное пространство у катода расширяется. Наконец, при давлении порядка 0,001 *мм* ртутного столба вся трубка оказывается почти тёмной, т. е. газ перестаёт светиться, но стекло трубки, расположенное против катода, начинает светиться жёлто-зелёным светом.

На рисунке 114 изображена трубка, внутри которой против катода установлен металлический экранчик в форме звезды. При соединении электродов с источником высокого напряжения на стенке трубки, противоположной катоду, появляется резкая тень звезды на фоне яркого жёлто-зелёного свечения остальной части поверхности трубки.

Тень исчезает при перемене полюсов у электродов. В этом опыте замечательно то, что если катодом служит диск, то независимо от того, где находится анод — за экранчиком или где-нибудь сбоку трубки,— экранчик-звезда даёт резкую тень.

На основании описанного опыта можно сделать вывод, что поверхность катода испускает особого рода лучи, распространяющиеся, подобно световым лучам, прямолинейно. Одно время и полагали, что это излучение по своей природе тождественно световым лучам, поэтому оно получило название *катодных лучей*.

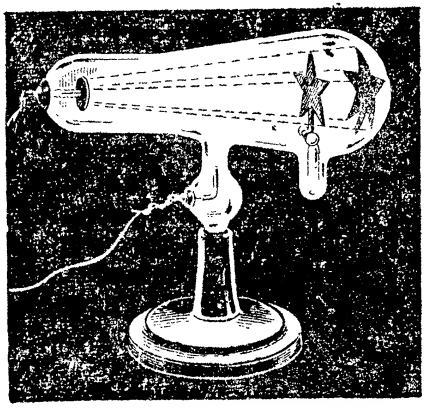


Рис. 114. Тень от экрана в катодных лучах.

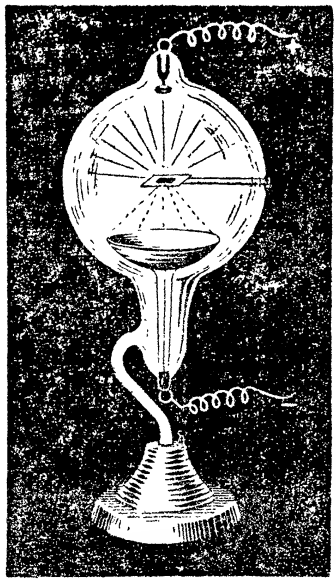


Рис. 115. Нагревание платиновой фольги катодными лучами.

Придав катоду форму сферической вогнутой поверхности, мы можем собрать катодные лучи в одной точке. Если эта точка окажется на металлической фольге (например, платиновой), то катодные лучи могут раскалить её добела (рис. 115). Следовательно, катодные лучи обладают энергией.

Катодные лучи, будучи сами невидимы, заставляют светиться (люминесцировать) многие вещества. Так, например, в предыдущем опыте под действием этих лучей люминесцировало стекло трубки. Помещая в трубку на пути катодных лучей различные минералы, мы заметим, что они ярко светятся, причём цвет свечения зависит от состава минерала (рис. 116). Это свойство катодных лучей позволяет нам проследить их путь при помощи люминесцирую-

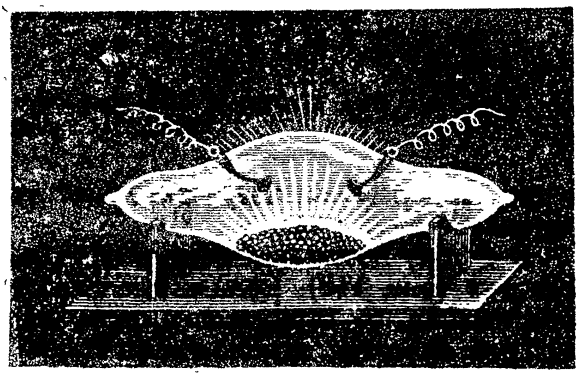


Рис. 116. Свечение минералов под действием катодных лучей.

щих экранов, представляющих собой тонкие пластинки, равномерно покрытые порошком сернистого цинка или какого-нибудь другого люминесцирующего вещества. Если такой экран поместить на пути катодных лучей, то можно наблюдать интенсивную люминесценцию экрана под действием лучей.

Катодные лучи обладают способностью проходить через очень тонкие металлические пластинки ($d = 0{,}003—0{,}03$ *мм*).

Они действуют на фотографическую пластинку так же, как и световые лучи. Кроме того, они способны ионизировать воздух.

71. Природа катодных лучей. Что же представляют собой катодные лучи? Какова природа этих лучей?

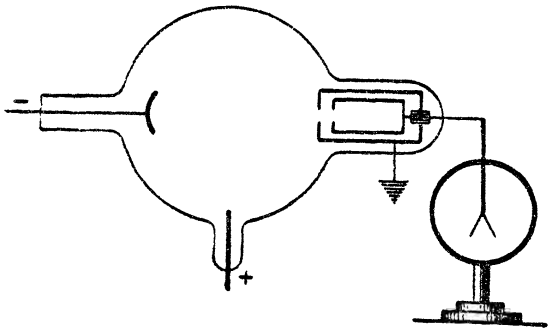


Рис. 117. Опыт, обнаруживающий, что катодные лучи являются потоком заряженных частиц.

Французский учёный Перрен для установления природы катодных лучей проделал следующий опыт. Он помещал на пути катодных лучей полый металлический цилиндр, куда они попадали, как в ловушку. Этот цилиндр он соединял с электрометром (рис. 117). Если катодные лучи несут с собой электрические заряды, то, попав в цилиндр, они передадут ему свой заряд, который сразу же будет обнаружен электрометром. Оказалось, что электрометр в этом опыте действительно заряжался, причём заряжался отрицательно. Чтобы окончательно решить вопрос

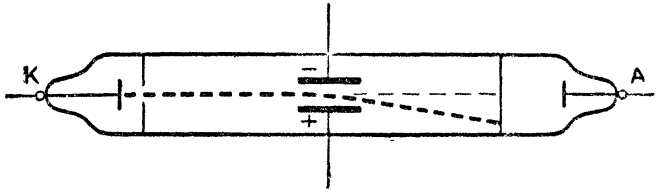


Рис. 118. Опыт, обнаруживающий знак заряда катодных лучей.

о том, какой заряд несут катодные лучи, потребовалось дополнительное исследование.

В трубку впаивался конденсатор, состоящий из двух плоских пластин (рис. 118). Если к пластинам конденсатора приложить напряжение, то отрицательные частицы притянутся к положительной пластине, а положительные частицы — к отрицательной пластине.

Проделав такой опыт с катодными лучами, можно убедиться, что пучок катодных лучей отталкивается от пластины конденса-

тора, заряженной отрицательно, и притягивается к положительной пластине. Этим опытом окончательно было доказано, что *катодные лучи представляют собой поток отрицательно заряженных частиц.*

Более того, вскрылось весьма важное обстоятельство — частицы в пучке катодных лучей оказались все имеющими одинаковый заряд и массу, которая меньше почти в 2000 раз массы атома водорода. Частицы эти оказались электронами.

Итак, ***катодные лучи представляют собой поток электронов, вылетающих из металлического катода.***

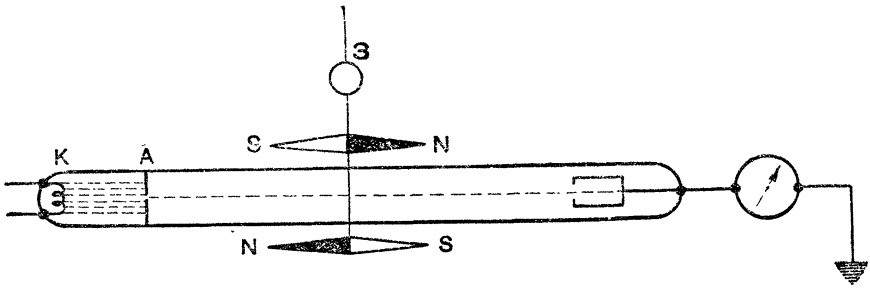


Рис. 119. Опыт, обнаруживающий наличие магнитного поля вокруг катодных лучей.

Заряд электрона, как указывалось в § 9, $e=-4{,}8\cdot10^{-10}$ ед. заряда СГСЭ, масса электрона $m=9{,}1\cdot10^{-28}$ *г*.

Скорость электронов в катодном пучке различна, но она вообще весьма велика и при очень высоких напряжениях может быть близка к скорости света в вакууме $\left(c=3\cdot10^{10}\ \frac{см}{сек}\right)$.

Пучок катодных лучей представляет собой в сущности электрический ток.

Советский учёный А. Ф. Иоффе показал, что магнитные стрелки, помещённые вблизи пучка катодных лучей, отклоняются так же, как они отклоняются вблизи проводника с током (рис. 119). Следовательно, вокруг пучка катодных лучей существует магнитное поле. Поднося к трубке магнит, можно заметить на экране смещение пучка катодных лучей (рис. 120); следовательно, катодные лучи отклоняются

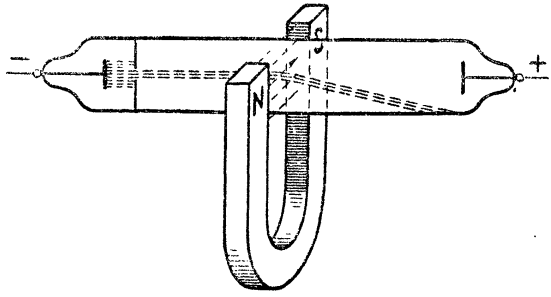


Рис. 120. Отклонение катодных лучей в магнитном поле.

в магнитном поле, подобно тому как отклоняется в магнитном поле подвижной проводник с током.

Рассмотрим теперь, что является причиной возникновения катодных лучей. Ответ на этот вопрос мы получим, познакомившись с тем, что происходит в разрядной трубке при тлеющем разряде.

Если промерить напряжённости электрического поля в разрядной трубке, то окажется, что вблизи катода, в сравнительно тонком слое газа, напряжённость поля весьма велика; здесь, следовательно, имеет место наибольшее падение потенциала. Это очень важное обстоятельство. Положительные ионы газа в сильном поле вблизи катода приобретают большую кинетическую энергию. При соударении с катодом они вырывают из него некоторое количество электронов, которые начинают двигаться от катода к аноду. Так как газ в трубке сильно разрежён, то эти электроны успевают пролететь некоторое расстояние, не соударяясь с молекулами газа. Этим объясняется наличие в трубке катодного тёмного пространства. Разогнавшись в этом пространстве, электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа, результатом которой является положительный светящийся столб.

По мере разрежения газа увеличивается длина свободного пробега электронов, столкновения электронов с молекулами газа делаются всё реже и реже, а световые явления, связанные с ионизацией газа, бледнеют. Положительный столб постепенно сокращается, катодное же тёмное пространство, напротив, расширяется. При давлениях порядка 0,001 *мм рт. ст.* значительная часть электронов пробегает всю длину трубки прямолинейно, без столкновений с молекулами. Бомбардируя своими ударами стенки трубки, электроны вызывают люминесценцию стекла и его нагревание.

Итак, ***причиной возникновения катодных лучей является бомбардировка металлического катода в разрядной трубке положительными ионами сильно разрежённого газа.***

Очевидно, что если удалить из трубки полностью газ, то катодные лучи в такой трубке не возникнут.

ГЛАВА III

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

72. Магнитное поле. В главе I, рассматривая взаимодействие наэлектризованных тел, мы ознакомились с существованием вокруг электрических зарядов электрического поля. Было установлено, что везде, где имеется электрический заряд, в пространстве вокруг него существует электрическое поле. Мы знаем также, что под действием сил электрического поля происходит движение заряженных частичек — электронный ток в металлах и вакууме и ионный ток в жидкостях и газах.

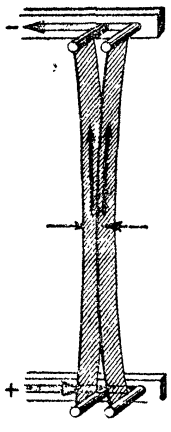


Рис. 121. Проводники притягиваются, если токи в них направлены в одну сторону.

При изучении явлений, сопровождающих прохождение электрического тока по проводникам, мы встречаемся с такими свойствами электрических зарядов, которые присущи им только в состоянии движения.

Одно из важнейших свойств движущихся зарядов проявляется во взаимодействии проводников, по которым проходит электрический ток. Ознакомимся с этим явлением на опыте.

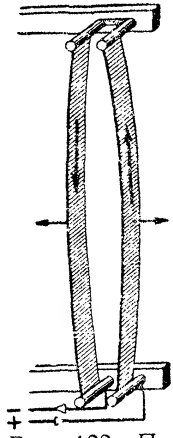


Рис. 122. Проводники отталкиваются, если токи в них направлены в противоположные стороны.

Расположим два гибких прямых проводника параллельно друг другу, подвесив их, например, к какой-нибудь стойке. При пропускании тока по проводникам они будут взаимодействовать между собой — притягиваться или отталкиваться.

Притягиваются проводники тогда, когда токи в них направлены в одну сторону (рис. 121), и отталкиваются при противоположных направлениях токов (рис. 122).

Как же происходит этот процесс взаимодействия проводников с токами?

Рассмотрим сначала, не является ли наблюдаемое нами явление результатом взаимодействия электрических зарядов, находящихся в проводниках, которое мы наблюдали при равновесии зарядов. Проверим наше предположение на опыте. Соединим один из проводников с положительным полюсом источника тока, а другой — с отрицательным, цепь же разомкнём. На проводниках при этом сосредоточатся разноимённые электрические заряды, вокруг которых будет существовать электрическое поле. Электрическое же взаимодействие между проводниками столь слабо, что его даже невозможно обнаружить глазом. Но стоит нам только замкнуть цепь, т. е. пропустить по проводникам ток, как тотчас же мы обнаружим отталкивание проводников друг от друга. Следовательно, взаимодействие проводников с токами не есть результат взаимодействия покоящихся электрических зарядов, оно имеет иной характер. Чтобы выяснить причину этого взаимодействия, продолжим наше исследование.

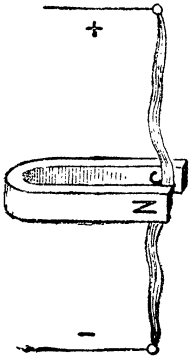


Рис. 123. Проводник, по которому течёт ток, отклоняется магнитом.

Повесим вертикально гибкий проводник (мишуру) и расположим его между полюсами магнита (рис. 123). Пропуская через проводник ток сверху вниз, мы заметим, что проводник отклонился вправо. При перемене местами полюсов магнита проводник отклоняется влево. Если переменить направление тока и пустить его снизу вверх, то и наблюдаемые отклонения проводника под влиянием магнита тоже переменят своё направление.

Проделаем ещё один опыт. Возьмём магнитную стрелку, установленную на остриё, и расположим вдоль её оси проводник

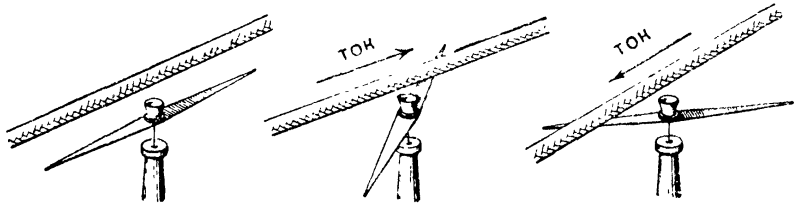


Рис. 124. Электрический ток действует на магнитную стрелку.

(рис. 124). При пропускании по нему тока стрелка отклоняется от своего первоначального положения.

Такой опыт, обнаруживший связь, существующую между электрическими и магнитными явлениями, впервые был проделан датским учёным Эрстедом в 1820 г.

Все эти опыты приводят нас к заключению, что силы, которые проявляются при взаимодействии токов, при действии магнита

на ток или тока на магнит, имеют одну и ту же природу. Их называют магнитными силами. Источником магнитных сил является магнитное поле, существующее в пространстве, окружающем магниты и проводники с токами.

Итак, между движущимися электрическими зарядами, кроме электрических сил, действуют ещё и магнитные силы.

Изучение разнообразных магнитных явлений показало, что ***всюду, где есть электрический ток, т. е. движущиеся электрические заряды, существует и магнитное поле.*** Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

Так как магнитное поле возникает вокруг проводника, когда в последнем появляется ток, то ток часто рассматривается как источник магнитного поля. В этом смысле надо понимать выражения: «магнитное поле, созданное током», «магнитное поле тока» и т. п.

73. Направление магнитного поля. Расположим проволочную катушку вблизи магнитной стрелки так, чтобы ось катушки была перпендикулярна оси стрелки (рис. 125, *а*). Пропустив по катушке ток, мы заметим, что под действием сил поля магнитная стрелка повернётся и установится вдоль оси катушки (рис. 125, *б*). Перемещая стрелку вокруг катушки с током, мы обнаружим, что в разных точках магнитного поля стрелка ориентируется по-разному.

Ориентирующее действие магнитного поля на стрелку указывает на его направленность. Под направлением магнитного поля в данной точке мы будем понимать направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки.

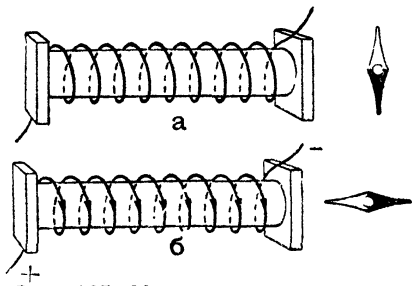


Рис. 125. Магнитная стрелка устанавливается вдоль оси катушки, если по последней проходит ток.

Рассмотрим теперь, зависит ли направление магнитного поля от направления тока в проводнике. Для этого проделаем опять опыт.

Расположим вокруг катушки с током в разных местах несколько небольших магнитных стрелок. Направление осей этих стрелок указывает на направление магнитного поля в местах их расположения (рис. 126). Изменим направление тока в катушке. Стрелки также изменят свои положения — каждая из них повернётся на 180°, т. е. изменит своё направление на противоположное (рис. 127). Значит, при перемене направления тока в проводнике меняется на противоположное и направление магнитного поля.

Следовательно, направление магнитного поля зависит от направления электрического тока, вокруг которого поле возникает.

74. Магнитное поле прямолинейного тока. Существование магнитного поля вокруг проводника с током можно обнаружить различными способами. Один из этих способов заключается в исполь-

зовании железных опилок. В магнитном поле кусочки железа, из которых состоят железные опилки, становятся маленькими магнитными стрелочками. Каждая из этих стрелочек в магнитном поле устанавливается так, что её ось совпадает с направлением магнитного поля в данном месте. При помощи множества таких стрелочек можно увидеть, как изменяется направление сил, действующих в магнитном поле, при переходе от одной точки поля к другой. Такое расположение железных опилок в магнитном поле называется магнитным спектром.

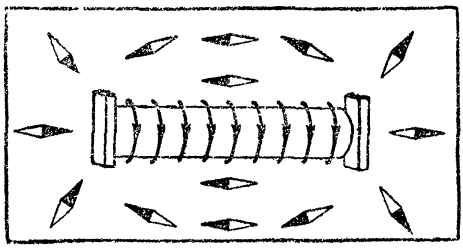


Рис. 126. Магнитные стрелки устанавливаются в направлении действия магнитных сил поля катушки.

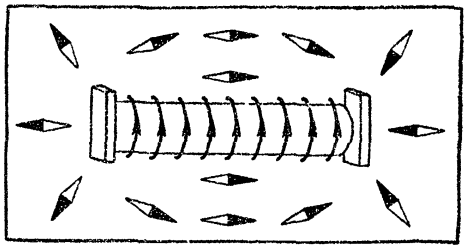


Рис. 127. При изменении направления тока в катушке стрелки поворачиваются на 180°.

Воспользуемся железными опилками и рассмотрим магнитное поле прямолинейного тока. Для этого пропустим проводник сквозь лист картона, а на картон насыплем тонкий слой железных опилок. Мы заметим, что при пропускании тока по проводнику опилки расположатся вокруг него по концентрическим окружностям (рис. 128).

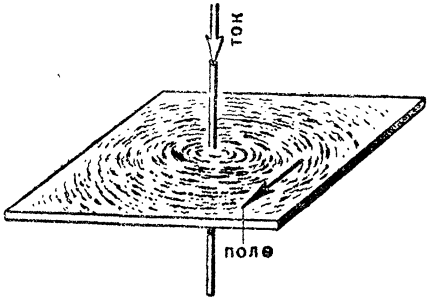


Рис. 128. Картина силовых линий магнитного поля прямого тока.

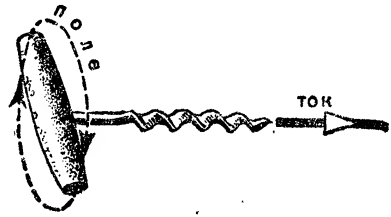


Рис. 129. Правило буравчика.

Линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются оси маленьких магнитных стрелок, называются силовыми линиями магнитного поля.

С помощью силовых линий удобно изображать магнитные поля графически.

Силовая линия проводится так, что касательная к ней в любой её точке указывает направление силы, действующей в этой точке на северный полюс магнитной стрелки.

Цепочки, которые образуют в магнитном поле железные опилки, показывают форму силовых линий магнитного поля.

Силовые линии магнитного поля тока являются замкнутыми кривыми, охватывающими проводник. В частности, силовые магнитные линии прямого тока, как показывает расположение опилок на рисунке 128, представляют собой концентрические окружности, центры которых находятся на линии тока.

Для определения направления силовых линий магнитного поля тока в связи с направлением тока вместо опилок нужно воспользоваться магнитными стрелками. Поместив их вокруг проводника с током, мы определим направление силовых линий. При изменении направления тока в проводнике на противоположное магнитные стрелки поворачиваются на 180°, что указывает на соответствующее изменение направления силовых линий поля. На рисунке 128 стрелкой показано направление магнитного поля тока.

Направление силовых линий магнитного поля связано с направлением тока в проводнике простым правилом, предложенным английским учёным Максвеллом:

если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика при этом совпадает с направлением силовых линий магнитного поля, существующего вокруг проводника.

Это правило называется иногда правилом буравчика (рис. 129).

75. Магнитное поле кругового тока. Возьмём теперь проводник, согнутый по окружности (рис. 130), и, пропустив по нему ток, будем опять наблюдать расположение опилок на картоне, установленном перпендикулярно к плоскости круга и проходящем че-

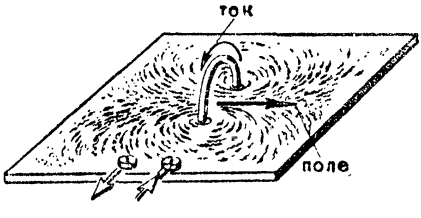


Рис. 130. Магнитное поле кругового тока.

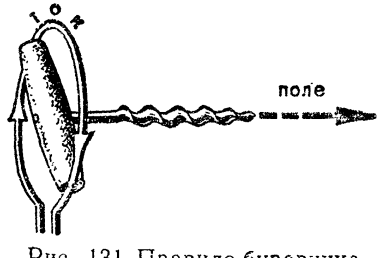


Рис. 131. Правило буравчика для кругового тока.

рез его центр. Мы обнаружим, что магнитные силовые линии уже не являются правильными окружностями, но и в этом случае все линии замыкаются, обходя проводник, по которому идёт ток. Таким образом, магнитные силовые линии тока всегда замыкаются вокруг тока.

Помещая в различные точки этого поля небольшие магнитные стрелки, можно определить направления силовых линий поля.

Правило буравчика применимо, конечно, и к круговому току, однако в этом случае удобнее поменять местами направление магнитного поля и направление тока (рис. 131). Действительно, если ручку буравчика вращать по току, то движение его острия покажет направление магнитного поля внутри кругового тока.

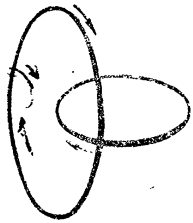


Рис. 132. Силовая линия магнитного поля и замкнутый ток.

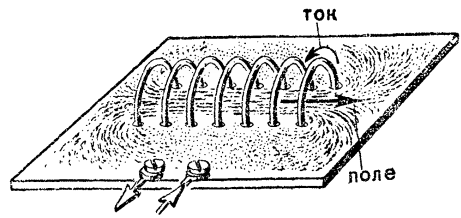


Рис. 133. Картина силовых линий магнитного поля соленоида.

Итак, ***направление тока и силовых линий его магнитного поля суть два взаимно связанных направления.***

На рисунке 132 изображена картина сцепления силовой линии магнитного поля и силовой линии электрического поля внутри кругового проводника в виде колец со стрелками, указывающими направление магнитного поля и направление тока.

76. Магнитное поле катушки с током. Пропустим ток через катушку, состоящую из многих витков проволоки, называемую соленоидом [1]. Магнитное поле, которое создаётся проходящим через эти витки электрическим током, можно представить себе как результат слияния магнитных полей токов в отдельных витках. Когда длина катушки значительно превосходит диаметр витков, то внутри этой катушки получается магнитное поле (рис. 133), силовые линии которого параллельны друг другу. На концах катушки силовые линии расходятся и замыкаются вне катушки. На рисунке 133 стрелка показывает направление силовой линии магнитного поля катушки.

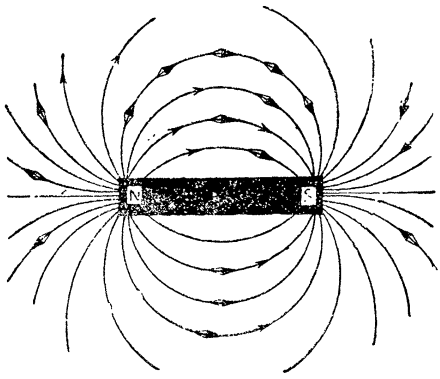


Рис. 134. Картина магнитного поля постоянного магнита.

Нетрудно подметить сходство между магнитным полем соленоида (вне его) и магнитным полем постоянного магнита (рис. 134). Можно условно считать, что силовые линии выходят с одной стороны катушки и входят в другую. Конец катушки, из которого силовые линии выходят, аналогичен северному полюсу

[1] Соленоид (от греч.— соленоидес) — трубообразный.

магнита, другой же конец катушки, в который силовые линии входят, аналогичен южному магнитному полюсу.

Полюсы катушки с током на опыте легко определить с помощью магнитной стрелки.

Зная же направление тока в витках катушки, эти полюсы можно определить и по правилу буравчика. Вращая, как и в случае кругового тока, ручку буравчика по току, мы по движению его острия определим направление силовых линий магнитного поля катушки, а следовательно, и полюсы катушки.

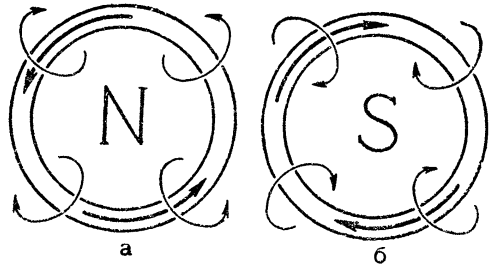


Рис. 135. Северный и южный полюсы соленоида.

Северным полюсом катушки будет тот её конец, на котором ток в витках катушки для наблюдателя, смотрящего на этот конец, будет течь против часовой стрелки (рис. 135, *а*). Другой конец катушки будет южным полюсом, ток здесь будет обходить витки по часовой стрелке (рис. 135, *б*). Для перемены полюсов катушки достаточно изменить направление тока в ней.

77. Действие магнитного поля на проводник с током. В § 72 мы установили, что два проводника с токами взаимодействуют друг с другом. Это явление объясняется тем, что сила, которую испытывает каждый из проводников, обусловлена магнитным полем, создаваемым током другого проводника.

Следует ожидать поэтому, что если мы поместим проводник с током в магнитное поле, например в поле постоянного магнита, то на него будет действовать сила. Проверим это на опыте. Замкнув цепь, пропустим ток по свободно подвешенному проводнику *AB*, находящемуся в магнитном поле подковообразного магнита. Мы заметим, что проводник придёт в движение (рис. 136).

Уберём магнит, и проводник двигаться не будет. Значит, со стороны магнитного поля на проводник с током действует сила *F* так же, как действует сила со стороны магнитного поля на магнитную стрелку. Изменяя направление тока или направление силовых линий магнитного поля, мы замечаем, что меняется и направление движения проводника, а значит, и направление действующей на проводник силы.

Направление действующей на проводник с током силы в магнитном поле можно определить, пользуясь правилом левой руки. Руку располагают так, чтобы силовые линии поля входили в ладонь, четыре пальца были направлены по току; тогда отставленный на 90° большой палец расположится вдоль направления действующей на проводник силы (рис. 137).

Практически важное значение имеет вращение прямоугольной рамки с током в однородном магнитном поле. На рисунке 138 плоскость рамки $ABCD$ расположена параллельно силовым линиям поля. Направление тока показано стрелками.

Применяя правило левой руки, найдём, что на часть рамки AB действует сила F_1, направленная от нас за чертёж. К части рамки CD приложена сила F_2, направленная от чертежа к нам. На части же рамки AC и BD, которые расположены вдоль силовых линий поля, силы не действуют. Силы F_1 и F_2 равны и параллельны друг другу, так как части рамки AB и CD одинаковы и параллельны. К рамке в целом, следовательно, приложена пара сил, под действием которой она повернётся и установится так, что плоскость её окажется перпендикулярной полю. В таком положении рамки вращающий момент, действующий на неё, равен нулю.

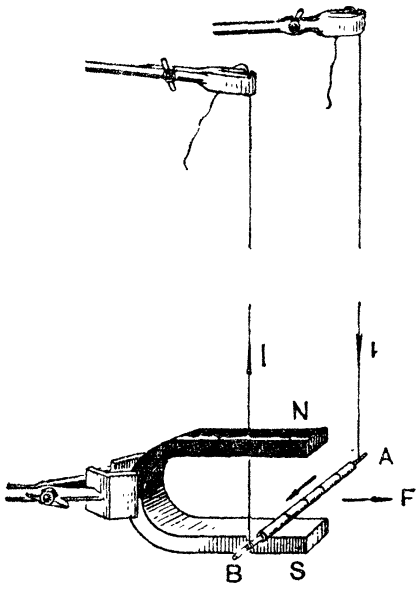


Рис. 136. Опыт, показывающий, что магнитное поле действует на проводник с током с некоторой силой.

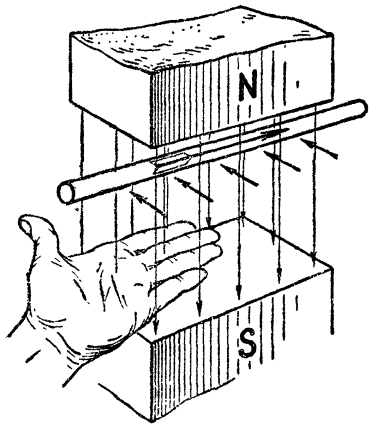


Рис. 137. К правилу левой руки.

Если бы в начале опыта ток в рамке был направлен в противоположную сторону, то и рамка повернулась бы в противоположную сторону.

Движение проводника с током в магнитном поле имеет огромное применение в технике: в электродвигателях, в измерительных приборах с вращающейся катушкой и во многих других устройствах. Некоторые из этих применений будут рассмотрены дальше.

78. Индукция магнитного поля. Мы знаем теперь, что на проводник с током в магнитном поле действует сила. Направление этой силы зависит от направления силовых линий поля и направления тока; если последние известны, то направление силы может быть определено по правилу левой руки.

Рассмотрим теперь, от чего зависит величина этой силы. Обратимся опять к опыту.

Подвесим к левому плечу коромысла рычажных весов линейный проводник AB и поместим его между полюсами N и S электромагнита (рис. 139) так, чтобы он был перпендикулярен силовым линиям магнитного поля. Последовательно с этим проводником включим амперметр, а также реостат, с помощью которого можно изменять ток в нашем проводнике (на рисунке 139 амперметр и реостат не показаны). Уравновесим весы и замкнём цепь. Пусть ток в проводнике AB направлен от B к A. Равновесие весов нарушится; чтобы его восстановить, на правую чашку придётся положить добавочный разновесок, вес которого будет равен силе, действующей на проводник вертикально вниз. Будем теперь из-

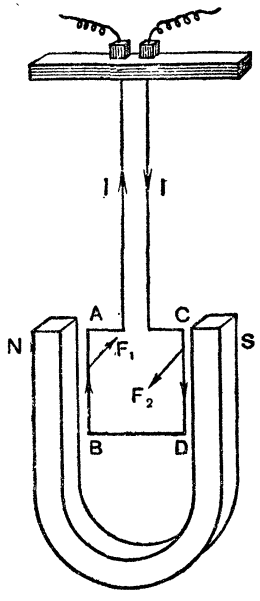


Рис. 138. На рамку с током в магнитном поле действует вращающий момент.

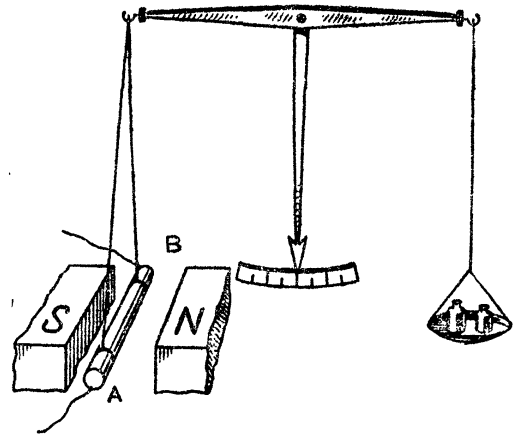


Рис. 139. Схема установки для определения индукции магнитного поля.

менять ток в нашем проводнике; мы заметим, что с увеличением тока увеличивается и сила, действующая на проводник. Измерения покажут нам, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник, прямо пропорциональна току, протекающему по нему.

Зависит ли эта сила от длины проводника AB? Чтобы решить этот вопрос, будем брать проводники разной длины при одном и том же токе. Измерения покажут нам, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, прямо пропорциональна длине части проводника, расположенной в магнитном поле.

Пусть F — сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, l — длина проводника и I — ток в нём.

С изменением длины проводника l и тока в нём меняется, как мы видели, и величина силы F.

Отношение же силы F к длине проводника I и к току в нём

есть величина постоянная, не зависящая ни от длины проводника, ни от тока в нём; следовательно, величина этого отношения может служить характеристикой магнитного поля.

Эту величину называют индукцией магнитного поля или просто магнитной индукцией.

Обозначим индукцию магнитного поля буквой B. Согласно определению, можно написать:

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

В системе единиц СИ *за единицу индукции магнитного поля принимается индукция такого поля, в котором на проводник с током* 1 *а длиной* 1 *м действует сила* 1 *н*. Наименование такой единицы: $1\frac{\text{ньютон}}{\text{ампер}\cdot\text{метр}}$ (сокращённо $1\frac{н}{а\cdot м}$).

Покажем, что $1\frac{н}{а\cdot м} = 1\frac{в\cdot сек}{м^2}$:

$$1\frac{н}{а\cdot м} = 1\frac{н\cdot м}{а\cdot м^2} = 1\frac{дж}{а\cdot м^2} = 1\frac{в\cdot а\cdot сек}{а\cdot м^2} = 1\frac{в\cdot сек}{м^2} = 1\ тл\ (\text{тесла}).$$

Единица 1 вольт-секунда называется вебером (*вб*). Следовательно, единицей индукции магнитного поля является $1\frac{вб}{м^2}$.

Индукция магнитного поля — векторная величина. Направление вектора индукции в данной точке совпадает с направлением силовой магнитной линии, проходящей через эту точку.

В системе СИ индукция магнитного поля является силовой характеристикой магнитного поля, подобно тому как напряжённость электрического поля (§ 8) является силовой характеристикой электрического поля.

Зная индукцию магнитного поля, можно рассчитать силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля, по формуле: $F = BIl$.

В общем случае $F = BIl\sin\alpha$, где α — угол между направлением тока (I) и вектором индукции магнитного поля (B).

Упражнение 14.

1. На линейный проводник длиной 40 *см*, расположенный перпендикулярно магнитному полю, действует сила, равная 0,1 *н*. Определить индукцию поля, если ток в проводнике 3 *а*.

2. Между полюсами электромагнита помещён прямолинейный проводник перпендикулярно направлению магнитного поля. Часть проводника, находящаяся в поле, имеет длину 50 *см*. Определить силу, с которой магнитное поле действует на проводник, если индукция магнитного поля равна $4\frac{вб}{м^2}$, а ток в проводнике 2 *а*.

3. Между полюсами электромагнита на двух лёгких спиральных пружинах подвешен прямолинейный проводник в форме «качелей» (перпендикулярно полю). Длина горизонтальной части проводника 15 *см*. Индукция магнитного поля равна $0{,}2\frac{вб}{м^2}$. При пропускании тока по проводнику каждая пружина растягивается с силой 3*Г*. Какой ток пропускается по проводнику?

79. Намагничивание железа. Мы знаем, что если внутрь катушки, по которой идёт электрический ток, вставить железный стержень, то он приобретёт свойства притягивать железные предметы и взаимодействовать с токами и другими магнитами, т. е. намагнитится. Рассмотрим это явление подробнее.

Установим вблизи катушки K вертикально расположенную железную стрелку C, могущую вращаться вокруг горизонтальной оси O (рис. 140). При пропускании тока через катушку мы заметим, что стрелка отклоняется на некоторый угол. Отодвинем катушку от стрелки на такое расстояние, чтобы отклонение стрелки стало едва заметным.

Изменяя сопротивление цепи с помощью реостата R, усилим ток в катушке; стрелка снова отклонится на некоторый угол. Увеличивая число витков в катушке, мы можем получить такое же отклонение стрелки и без увеличения тока в ней. В обоих этих случаях усиливается магнитное поле катушки, в частности увеличивается индукция поля в месте нахождения стрелки.

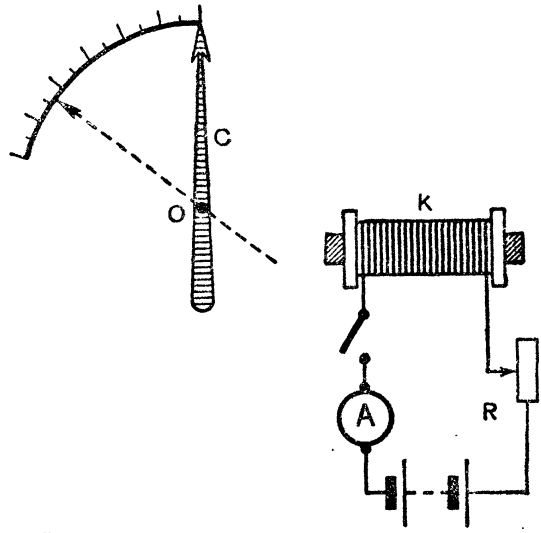


Рис. 140. Схема установки для изучения намагничивания железа.

Но можно достигнуть такого же усиления магнитного поля катушки и не увеличивая ни тока, ни числа витков в катушке. Для этого достаточно ввести внутрь катушки сердечник из мягкого железа.

В каком бы месте около катушки мы ни помещали стрелку, всюду её отклонение при введении железного сердечника внутрь катушки больше, чем без него.

Итак, *железный сердечник, помещённый в катушку, производит такое же магнитное действие, какое получается при увеличении тока в катушке или при увеличении числа витков в ней, или при одновременном увеличении того и другого.*

Произведение тока в амперах на число витков катушки называется ампер-витками. Пользуясь этим понятием, можно сказать, что введение железного сердечника внутрь катушки равносильно увеличению числа ампер-витков.

Французский учёный Ампер объяснил этот факт следующим образом. Раз железо увеличивает число ампер-витков катушки, при постоянных величине тока и числе витков, то это значит, что

в самом железе циркулируют скрытые токи того же направления, что и ток, идущий по катушке. Ампер высказал мысль, что эти скрытые токи циркулируют внутри каждой молекулы железа.

В ненамагниченном железе круговые «молекулярные токи» циркулируют в различных беспорядочно ориентированных в пространстве плоскостях (рис. 141, *а*). Индукция создаваемого ими поля в среднем равна нулю. Когда же железо вносится в катушку, то плоскости круговых молекулярных токов устанавливаются параллельно виткам катушки (рис. 141, *б*). Магнитные поля этих круговых токов суммируются друг с другом и с полем соленоида, поэтому магнитное действие катушки с железом усиливается.

Тепловое движение молекул железа несколько расстраивает ориентировку плоскостей молекулярных токов, но чем сильнее магнитное поле катушки, тем большее число молекулярных токов устанавливается параллельно виткам катушки. Это происходит до тех пор, пока не наступает состояние магнитного насыщения железа. В этом состоянии все молекулярные токи оказываются ориентированными параллельно виткам катушки. При прекращении тока в катушке тепловое движение молекул железа расстраивает правильную ориентировку плоскостей молекулярных токов, вследствие чего железный сердечник размагничивается.

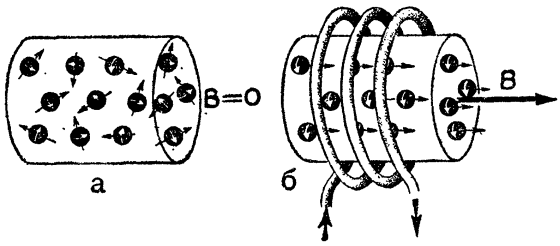


Рис. 141. К гипотезе Ампера.

Во времена Ампера о строении атома ничего не знали, поэтому природа молекулярных токов оставалась неизвестной; теперь же мы знаем, что в каждом атоме имеются отрицательно заряженные частицы — электроны, обладающие магнитными полями.

Совокупность полей, создаваемых всеми движущимися в атоме электронами, создаёт некоторое результирующее поле вокруг атома. Если атомы объединены в молекулы, то магнитные поля атомов образуют в совокупности магнитное поле молекулы. Наконец, можно представить себе и значительно более крупные, чем молекулы, образования, которые играют в веществе роль самостоятельных маленьких магнитов. Наличие таких образований определяется той или иной кристаллической структурой вещества и обусловливает, как теперь полагают, магнитные свойства железа, стали и некоторых других веществ, получивших название ферромагнитных.

К числу ферромагнитных веществ относятся также никель, кобальт и некоторые сплавы — магнико, пермалой и др.

В сердечнике из мягкого железа намагничивание носит временный характер, оно почти полностью исчезает с исчезновением тока в катушке. В сердечниках же, изготовленных из особых сортов стали и из специальных сплавов, намагничивание сохраняется. Из этих материалов изготовляют постоянные магниты в виде круглых стержней, полос, подков или стрелок. (См. приложение.)

80. Магнитный поток. При помощи силовых линий можно не только изображать направление поля, но и характеризовать величину индукции поля.

Условились проводить силовые линии так, чтобы через 1 $см^2$ площадки, перпендикулярно вектору индукции в данной точке, проходило число линий, равное индукции поля в этой точке.

Там, где индукция магнитного поля будет больше, силовые линии будут гуще. И, наоборот, там, где индукция поля меньше, реже и силовые линии.

Таким образом, по густоте силовых линий можно судить о величине вектора индукции магнитного поля, а по направлению силовых линий — о направлении вектора индукции.

Наблюдение магнитных спектров прямого тока и катушки показывает, что с удалением проводника индукция магнитного поля уменьшается, притом очень быстро.

Магнитное поле, индукция которого в различных точках неодинакова, называется неоднородным. Неоднородным полем является поле прямолинейного и кругового тока, поле вне соленоида, поле постоянного магнита и т. д.

Магнитное поле, индукция которого во всех точках одинакова, называется однородным полем. Графически однородное магнитное поле изображается силовыми линиями, представляющими собой равно отстоящие друг от друга параллельные прямые.

Примером однородного поля является поле внутри длинного соленоида, а также поле между близко расположенными друг к другу параллельными плоскими полюсными наконечниками электромагнита.

Произведение индукции магнитного поля, пронизывающего данный контур, на площадь контура называется потоком магнитной индукции или просто магнитным потоком (рис. 142).

Обозначая магнитный поток буквой Φ, площадь контура S и угол между направлением вектора индукции B и нормалью n к площади контура α, можно написать следующее равенство:

$$\Phi = B S \cos \alpha.$$

Магнитный поток — скалярная величина.

Так как густота силовых линий магнитного поля равна индукции магнитного поля, то магнитный поток равен всему числу силовых линий, пронизывающих данный контур.

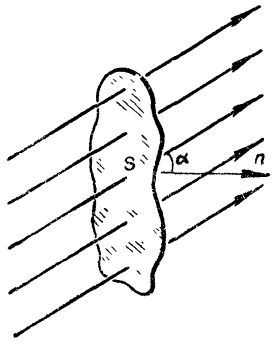


Рис. 142. К определению магнитного потока.

С изменением поля меняется и магнитный поток, пронизывающий контур: при усилении поля магнитный поток возрастает, при ослаблении — уменьшается.

За единицу магнитного потока в системе СИ принимается поток, пронизывающий площадку в 1 м², находящуюся в однородном магнитном поле, индукция которого равна 1 $\frac{вб}{м^2}$ *, и расположенную перпендикулярно вектору индукции.* Такая единица называется вебером:

$$1\ вб = 1\ \frac{вб}{м^2} \cdot 1\ м^2.$$

81. Электромагниты и их применение. Катушки с железными сердечниками внутри называются электромагнитами. В зависимости от назначения электромагниты изготовляют самых разнообразных размеров и форм.

Применение электромагнитов в электрическом звонке, телеграфе, электромоторе, генераторе было уже рассмотрено в начальном курсе физики. Дальше мы ознакомимся с некоторыми другими их применениями. А сейчас обратим внимание на одно существенное обстоятельство, касающееся электромагнитов.

Мы видели (§ 79), что магнитное поле катушки с железным сердечником значительно сильнее, чем поле без сердечника, потому что железо внутри катушки намагничивается током и поле его складывается с полем катушки. Поле сердечника усиливает поле катушки. Однако это утверждение справедливо только в определённых пределах. При сравнительно слабых токах, как показывает опыт, магнитное поле железного сердечника значительно сильнее поля катушки. С увеличением тока в катушке усиливаются оба поля — катушки и сердечника, а следовательно, усиливается и их суммарное поле. Но когда сердечник намагнитится до насыщения, а это случится при некотором токе в данной катушке, дальнейший рост тока усилит только поле одной катушки. При достаточно большом числе ампер-витков (несколько десятков тысяч на сантиметр длины катушки) магнитное поле самой катушки может оказаться значительно сильнее поля намагниченного до насыщения стержня. При изготовлении электромагнитов с этим фактом, конечно, приходится считаться.

Многие применяемые на практике электромагниты имеют обмотки, у которых число ампер-витков порядка нескольких сот на сантиметр. Это даёт возможность применять для обмоток сравни-

тельно тонкие проволоки и питать их сравнительно слабыми токами. На рисунке 143 изображены электромагниты подъёмных кранов.

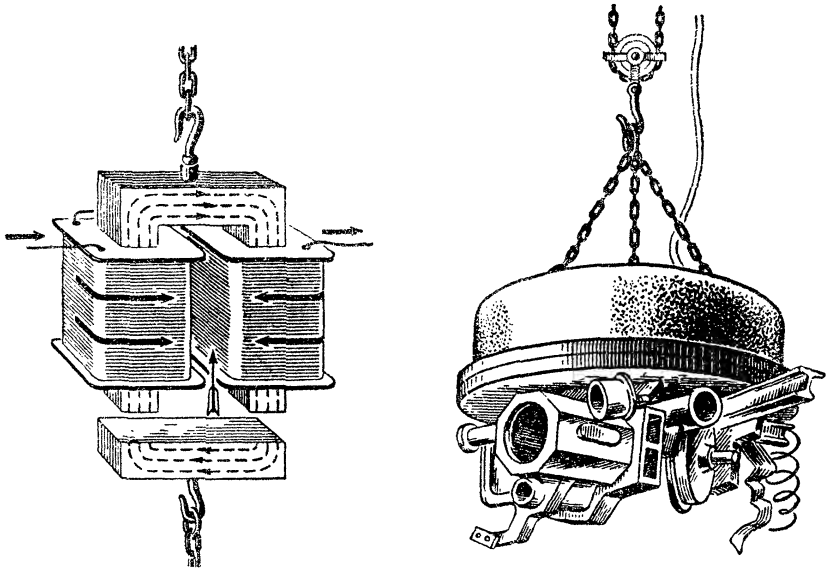


Рис. 143. Электромагниты подъёмных кранов.

82. Электромагнитное реле[1]. Электромагнитное реле представляет собой электромагнитный прибор, работающий на слабых токах. Реле широко применяются во всех областях техники —

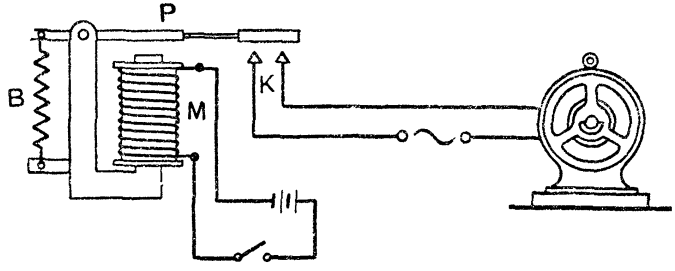


Рис. 144. Схема простейшего реле.

в автоматическом регулировании, при автоматизации производства и т. п.

Широкое применение реле обусловлено основным свойством реле — возможностью управлять достаточно мощными процесса-

[1] Слово «реле» — французского происхождения. Буквально оно означает «перепряжка». Такое название во Франции носили почтовые станции, на которых меняли и перепрягали лошадей в те времена, когда ещё не было железных дорог.

ми в рабочих электрических цепях с помощью слабых токов. Представление о принципе работы реле дает схема, изображённая на рисунке 144.

Когда по обмотке электромагнита *M* проходит управляющий (слабый) ток, железный сердечник электромагнита притягивает железную пластинку *P*, которая замыкает контакты *K* рабочей цепи, в которую могут быть включены электродвигатели, различные аппараты, электрические лампы и т. п. При размыкании управляющей цепи пружина *B* оттягивает пластинку *P* вверх; этим разрывается рабочая цепь.

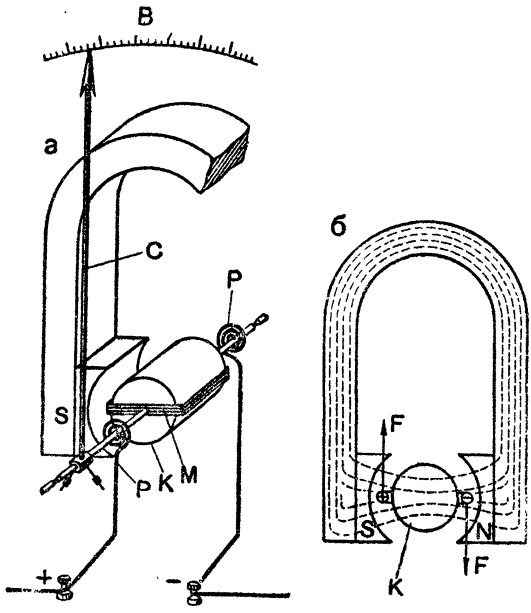


Рис. 145. Устройство гальванометра с вращающейся катушкой.

От чувствительности пружины *P* зависит, при каком наименьшем управляющем токе реле может «сработать».

83. Электроизмерительные приборы. Большинство стрелочных приборов, применяемых в измерительной технике, разделяется на системы в зависимости от того или иного действия тока или напряжения, используемого для создания вращающего момента. В школьных физических лабораториях чаще всего применяются электроизмерительные приборы двух систем: магнитоэлектрической и электромагнитной, их мы и рассмотрим.

1. *Магнитоэлектрические приборы.* В устройстве магнитоэлектрического прибора используется явление взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника, по которому проходит ток.

На рисунке 145 схематически изображена конструкция гальванометра с вращающейся катушкой. В узком просвете между полюсными наконечниками *N* и *S* сильного стального магнита и железным цилиндром *K* помещена лёгкая алюминиевая рамка *M*, на которой намотана катушка тонкой изолированной проволоки. Рамка укреплена на двух полуосях; с передней полуосью связана стрелка *C*, двигающаяся вдоль шкалы *B* при повороте рамки. Рамка с катушкой удерживается в определённом положении двумя спиральными пружинами *P* (рис. 145, *а*). Измеряемый ток через пружины *P* и полуоси подводится к катушке. Когда в катушке идёт

ток, она поворачивается в магнитном поле, и при этом пружины закручиваются. Рамка поворачивается до тех пор, пока момент пары *FF*, вращающий её (рис. 145, *б*), не уравновешивается противодействующим моментом, создаваемым упругостью закрученных пружин. Чем сильнее ток, тем больше угол поворота рамки.

Гальванометры данной системы очень чувствительны, весьма точны и имеют равномерную шкалу. Чтобы можно было данным прибором измерять напряжения, последовательно с катушкой гальванометра соединяют большое сопротивление. Гальванометр в сочетании с большим дополнительным сопротивлением является вольтметром (см. § 47, 48). Совокупность гальванометра с шунтом представляет собой прибор для измерения более значительных токов — амперметр (см. § 46).

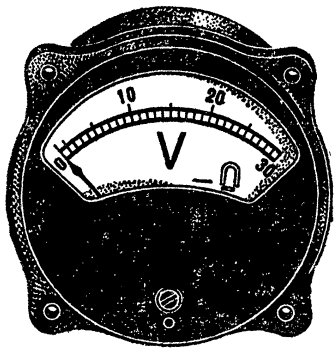


Рис. 146. Внешний вид щитового вольтметра.

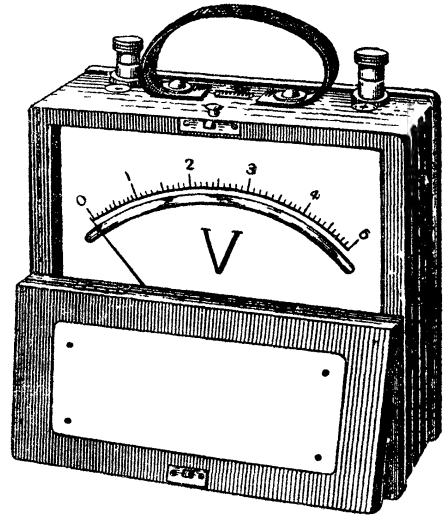


Рис. 147. Лабораторный вольтметр.

Область применения магнитоэлектрических приборов — лабораторные, контрольные и технические измерения в цепях постоянного тока.

На рисунке 146 изображён щитовой вольтметр магнитоэлектрической системы.

На лицевой стороне этого прибора под шкалой указано назначение прибора для измерений в цепях постоянного тока — прямая черта — и условное обозначение магнитоэлектрической системы — подковообразный магнит с небольшим прямоугольником (катушкой) между полюсами. На рисунке 147 показан внешний вид лабораторного вольтметра магнитоэлектрической системы. Добавочные сопротивления находятся внутри корпусов приборов.

2. *Электромагнитные приборы.* В основе устройства электромагнитного прибора лежит явление взаимодействия магнитного поля катушки и намагниченного ею куска железа.

Схема устройства такого прибора показана на рисунке 148. Железная пластинка *B* помещена вблизи катушки *A*. При пропускании по катушке тока пластинка втягивается в катушку, поворачивая стрелку *C*. Цилиндр *D*, в котором движется поршень *E*, служит для успокоения колебаний стрелки.

Связанная с осью пластины *B* пружина, закручиваясь, создаёт противодействующий момент.

Внешний вид щитового амперметра такой системы изображён на рисунке 149.

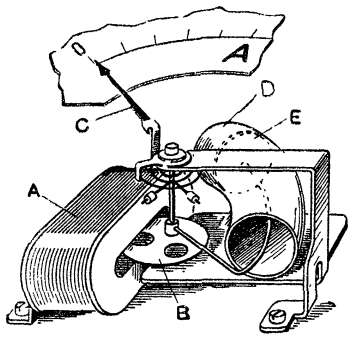


Рис. 148. Схема устройства электромагнитного прибора.

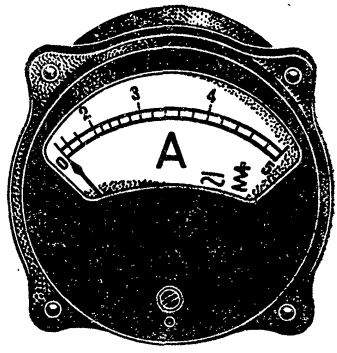


Рис. 149. Внешний вид щитового амперметра.

Приборы электромагнитной системы могут применяться для измерений в цепях постоянного и переменного тока, они имеют неравномерную шкалу. На лицевой стороне этого прибора указан условный знак прибора, могущего работать и на постоянном, и на переменном токе,— прямая черта и синусоида. Условное обозначение электромагнитной системы — прямой электромагнит.

84. Электромагнитный осциллограф. Осциллографом называется прибор, служащий для записи переменных электрических токов. Основной частью осциллографа является вибратор; устройство его изображено на рисунке 150. Между полюсами сильного постоянного магнита с помощью пружины *C* натянута тонкая металлическая лента *B* в форме петли, называемая шлейфом. К середине шлейфа прикреплено маленькое легкое зеркальце *A*. Когда по шлейфу проходит ток, то вследствие взаимодействия между током и магнитным полем шлейф поворачивается в магнитном поле, стремясь встать перпендикулярно полю. Пружина *C* создаёт противодействующий момент, пропорциональный углу поворота шлейфа из нулевого положения. Так как инерция шлейфа мала, то угол поворота зеркальца пропорционален мгновенному значению тока.

На рисунке 151 приведена схема расположения приборов для получения осциллограммы переменного тока.

На зеркальце *A* направляется достаточно мощный пучок лучей света от источника *C*. Отразившись от зеркальца под некоторым

углом, пучок света падает на экран или фотобумагу в виде светлой точки — «зайчика». На экране частые колебания «зайчика» образуют светлую полоску, тем более длинную, чем шире размах колебаний зеркальца. Чтобы выяснить форму этих колебаний, происходящих на экране в вертикальной плоскости, световой пучок направляют на зеркальный многогранник *М* и от последнего на экран *Э*. Зеркальный многогранник, приводимый во вращение двигателем с определённой скоростью, развёртывает эти колебания в горизонтальном направлении. «Зайчик» в течение каждого последующего периода будет повторно описывать на экране одну и ту же кривую тока.

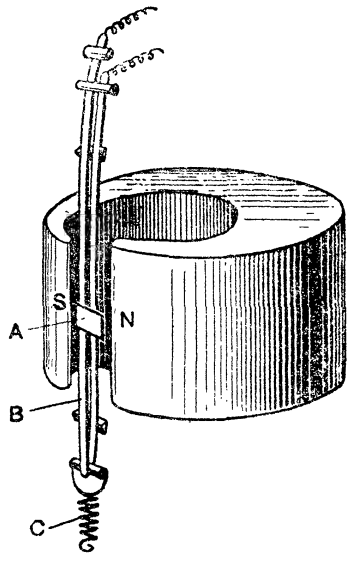


Рис. 150. Схема устройства осциллографа.

При помощи осциллографа можно получать также запись любых процессов, которые могут воздействовать на ток (например, запись звуковых колебаний, воспринимаемых микрофоном, запись переменного давления и т п.).

85. Микрофон и телефон. Всем хорошо известна телефонная трубка. На одном конце этой трубки укреплён собственно телефон, прижимаемый к уху при разговоре, а на другом — микрофон, воспринимающий звуки человеческого голоса и вызывающий соответствующие изменения тока в цепи.

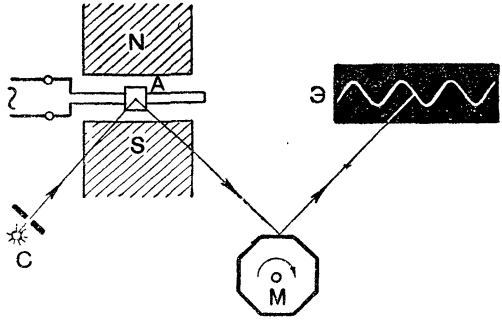


Рис. 151. Схема расположения приборов для получения осциллограмм.

На рисунке 152 отдельно изображена схема устройства микрофона. Основными деталями микрофона являются мембрана *В* (тонкая пластинка из стали или прессованного угля) и угольный порошок *Г*, заключённый в углубления угольной колодки *Б*.

Угольная колодка закреплена в корпусе *А* и изолирована от него прокладкой *Д*. На дне корпуса, тоже изолированно от него, укреплён неподвижный электрод *К*.

Электрический ток проходит через мембрану, угольную колодку, угольный порошок и электрод *К*.

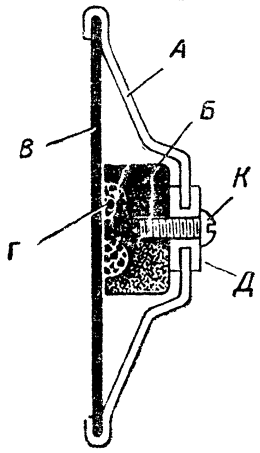


Рис. 152. Схема устройства микрофона.

Как работает микрофон? Когда на мембрану микрофона не попадают звуковые волны, тогда сопротивление порошка в нём неизменно и ток в цепи постоянен (рис. 153, участок *АВ*). Звуковые волны, падающие на мембрану микрофона, приводят её в колебания. Мембрана, колеблясь, вызывает изменение плотности контактов между отдельными зёрнышками порошка. Вследствие этого сопротивление порошка в микрофоне изменяется, что вызывает изменение тока в цепи, и эти изменения происходят в соответствии с колебаниями мембраны. Ток в цепи микрофона становится пульсирующим (отрезок *ВС* на рис. 153).

Таким образом, звуковые волны в микрофоне вызывают изменения электрического тока, который по проводам идёт в телефон.

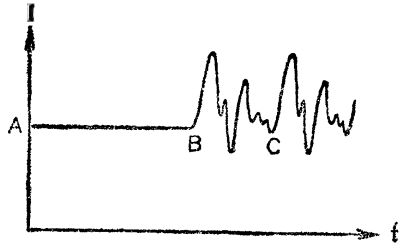


Рис. 153. График тока в цепи микрофона.

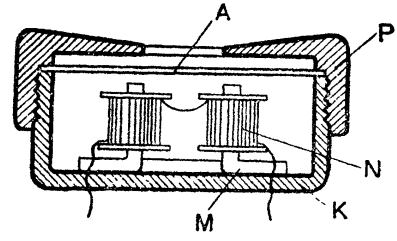


Рис. 154. Схема устройства телефона.

Схема устройства телефона изображена на рисунке 154. В корпусе телефона *К* находится постоянный магнит *М* со стальными полюсными наконечниками, на которые надеты катушки *N* из очень тонкого провода. Обмотки катушек соединены последовательно друг с другом. На корпусе *К* лежит мембрана *А*, представляющая собой тонкую стальную пластинку круглой формы. Между мембраной и полюсными наконечниками имеется небольшой воздушный зазор. Крышка *Р* прижимает мембрану *А* к корпусу *К*.

Если в катушках телефона нет тока, то мембрана притягивается к полюсам магнита с некоторой постоянной силой. Когда же по

катушке телефона идёт изменяющийся по величине ток, то он вызывает соответствующие изменения магнитного поля этих катушек. Если этот ток изменяется в соответствии со звуковыми колебаниями, то и дополнительное магнитное поле, созданное им, будет изменяться в соответствии с этими колебаниями.

Под действием изменяющегося магнитного поля мембрана телефона будет колебаться, приводя в колебание прилегающие к ней слои воздуха. В результате слушатель услышит в трубке те слова и фразы, которые в это время произносит в микрофон его собеседник.

86. Громкоговоритель. Громкоговоритель, так же как и телефон, служит для возбуждения звуковых волн действием переменного тока, меняющегося с частотой, соответствующей частоте звуков. В отличие от телефона громкоговоритель предназначен для одновременного обслуживания звуковой передачей многих слушателей.

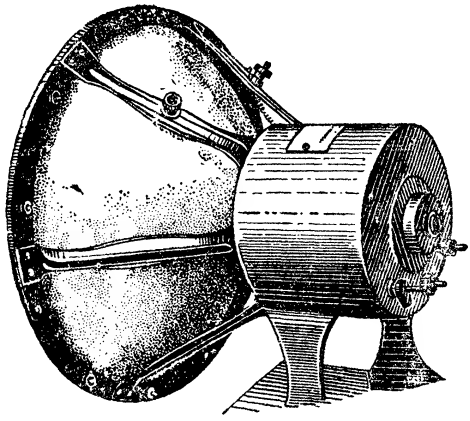


Рис. 155. Электродинамический громкоговоритель («динамик»).

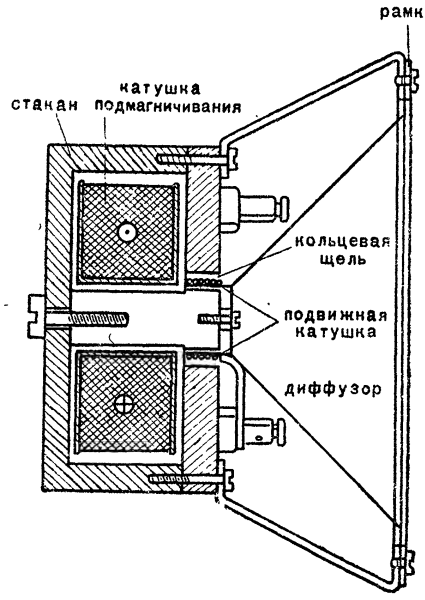


Рис. 156. Схема устройства динамика.

Существует несколько различных видов громкоговорителей. Наиболее совершенным из них является электродинамический громкоговоритель («динамик»). Внешний вид одной из многочисленных конструкций «динамиков» изображён на рисунке 155.

Понятие об устройстве громкоговорителя даёт схематический разрез его механизма, изображённый на рисунке 156. На оси массивного железного стакана намотана подмагничивающая катушка, питаемая постоянным током.

В крышке стакана сделана кольцевая щель, пронизываемая постоянным магнитным потоком. В эту щель помещена подвижная катушка, намотанная на лёгкий каркас, жёстко связанный

с бумажным конусом (диффузором). Диффузор прикрепляется к раме при помощи какого-нибудь мягкого материала (например, замши).

По подвижной катушке протекает переменный ток звуковой частоты. Взаимодействие этого тока с постоянным магнитным потоком, в котором находится катушка, вызывает колебания катушки, которые передаются связанному с ней диффузору. Колеблющийся диффузор создаёт в окружающем его воздухе звуковые волны.

В настоящее время промышленностью выпускаются динамики и без подмагничивающей катушки. Постоянные магниты для них изготовляются из специальных магнитных сплавов, обладающих высокими магнитными свойствами.

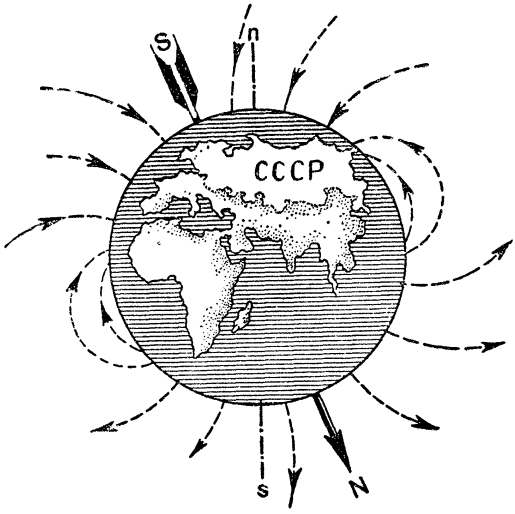


Рис. 157. Картина силовых линий магнитного поля Земли.

87. Магнитное поле Земли. Магнитная стрелка, укреплённая на вертикальной оси (если вблизи нет магнитов и электрических токов), всегда устанавливается в данном месте в определенном направлении: один конец её показывает на север, другой — на юг. Этот факт является доказательством того, что Земля окружена магнитным полем.

Наблюдая расположение магнитной стрелки, мы говорим, что северный конец стрелки указывает на север. Это не совсем верно. Направление магнитной стрелки не совпадает с направлением географического меридиана *ns* (рис. 157). Приближаясь к северному географическому полюсу Земли, магнитные линии всё больше и больше отклоняются от горизонта и около 70° 50′ северной широты и 96° западной долготы делаются вертикальными, входя в Землю. Здесь мы, следовательно, имеем южный магнитный полюс Земли *S*.

С другой стороны, вблизи южного географического полюса, а именно на 70° 10′ южной широты и 150° 45′ восточной долготы, магнитные линии выходят из Земли; здесь, следовательно, мы имеем северный магнитный полюс Земли *N*. Значит, магнитные полюсы не совпадают с географическими полюсами.

Вертикальная плоскость, в которой располагается продольная ось магнитной стрелки, называется плоскостью магнитного меридиана данной точки земной поверхности.

Угол D между географическим и магнитным меридианами данной местности называется магнитным склонением.

Магнитное склонение называют западным или восточным, в зависимости от того, к западу или востоку от плоскости географического меридиана отклоняется северный полюс магнитной стрелки (рис. 158—159).

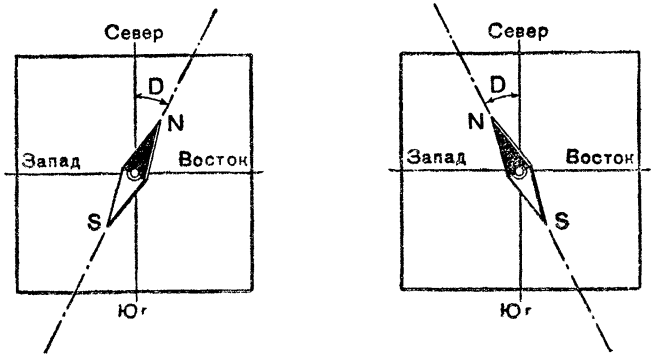


Рис. 158—159. К понятию магнитного склонения.

На рисунке 160 изображён прибор для измерения магнитного склонения. Этот прибор представляет собой не что иное, как обычный компас, устанавливаемый так, чтобы обозначенное на нём направление *С — Ю* лежало в плоскости географического меридиана данного места.

Ещё Колумб заметил, что магнитное склонение в различных местах имеет различную величину. Установлено, кроме того, что даже в одном и том же месте угол склонения не остаётся постоянным, а меняется весьма медленно из года в год.

Применяя для исследования земного магнитного поля стрелку, которая может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, можно заметить, что направление стрелки составляет угол с горизонтальным направлением. Угол I между осью

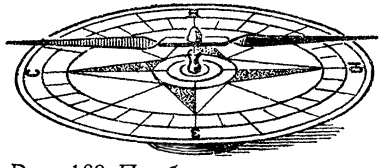


Рис. 160. Прибор для измерения магнитного склонения.

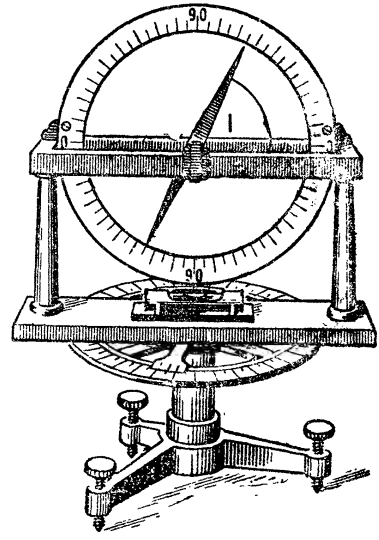


Рис. 161. Прибор для измерения магнитного наклонения.

стрелки и горизонтальной плоскостью называется магнитным наклонением (рис. 161). Этот угол в средних широтах близок к 70°, если стрелка расположена в плоскости магнитного меридиана.

На магнитных полюсах Земли угол наклонения равен 90°, а на магнитном экваторе угол наклонения равен 0°.

Ось магнитной стрелки, которая может свободно поворачиваться в любом направлении, устанавливается по направлению напряжённости магнитного поля Земли в данном месте.

Точки с одинаковым склонением на карте Земли соединяются в линии, называемые изогонами, а линии, соединяющие точки, обладающие одинаковым наклонением, называются изоклинами. Имея такую карту, можно при помощи компаса определить положение географического меридиана в каждой точке. Такими картами пользуются штурманы морских и воздушных кораблей.

Однако на земном шаре встречаются области, в которых напряжённость магнитного поля изменяется очень резко. Такие области называются областями магнитной аномалии.

Одной из самых больших магнитных аномалий является Курская магнитная аномалия. Причиной таких аномалий являются залежи магнитной железной руды на сравнительно небольшой глубине.

Природа земного магнетизма ещё не выяснена. Установлено только, что большую роль в изменении магнитного поля Земли играют разнообразные электрические токи, текущие как в атмосфере (особенно в верхних слоях её), так и в земной коре.

88. Явление электромагнитной индукции. Явление электромагнитной индукции открыто в 1831 г. Фарадеем. Это открытие принадлежит к числу самых замечательных научных достижений первой половины XIX столетия. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие учёные и техники разных стран и народов. Среди них были и наши отечественные учёные: Ленц, Якоби, Яблочков, Доливо-Добровольский и другие, внёсшие большой вклад в развитие электротехники.

Открытием электромагнитной индукции была окончательно установлена неразрывная связь между электрическим током и магнитным полем.

Открытие электромагнитной индукции не было случайным. Фарадей и многие другие учёные сознательно искали разрешения проблемы: «Если ток создаёт магнитное поле, то не существует ли обратной стороны явления, нельзя ли с помощью магнитного поля создать электрический ток»,— вот мысль, направлявшая учёных в их исследованиях.

Много труда затратил Фарадей и много проявил изобретательности, прежде чем отклонившаяся стрелка гальванометра впервые показала ему, что он не ошибся в своих предположениях.

На основе известных по курсу семилетней школы опытов рассмотрим теперь общие законы электромагнитной индукции.

Если в катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигается магнит, то стрелка гальванометра при этом отклоняется, указывая

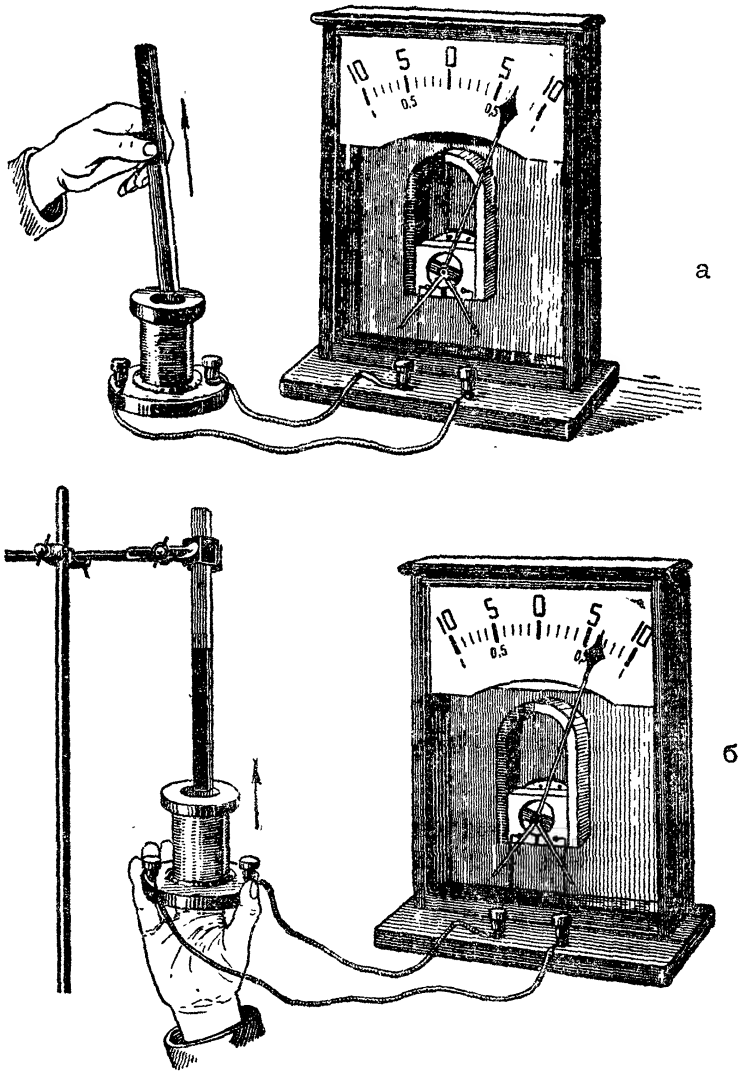


Рис. 162. Опыты по обнаружению явления электромагнитной индукции.

на появление индукционного (наведённого) тока в цепи катушки. При извлечении магнита из катушки снова наблюдается отклонение стрелки гальванометра, но в противоположную сторону, что указывает на возникновение в катушке тока противоположного направления (рис. 162, *а*).

Как только движение магнита относительно катушки прекращается, прекращается и ток. Следовательно, ток в цепи катушки существует только во время движения магнита относительно катушки.

Опыт можно видоизменить: на неподвижный магнит надевать катушку и снимать её (рис. 162, *б*). И опять можно обнаружить, что во время движения катушки относительно магнита в цепи снова появляется ток.

На рисунке 163 изображена катушка *A*, включённая в цепь источника тока. Эта катушка вставлена в другую катушку *B*, замкнутую на гальванометр. При замыкании и размыкании цепи катушки *A* в катушке *B* возникают индукционные токи.

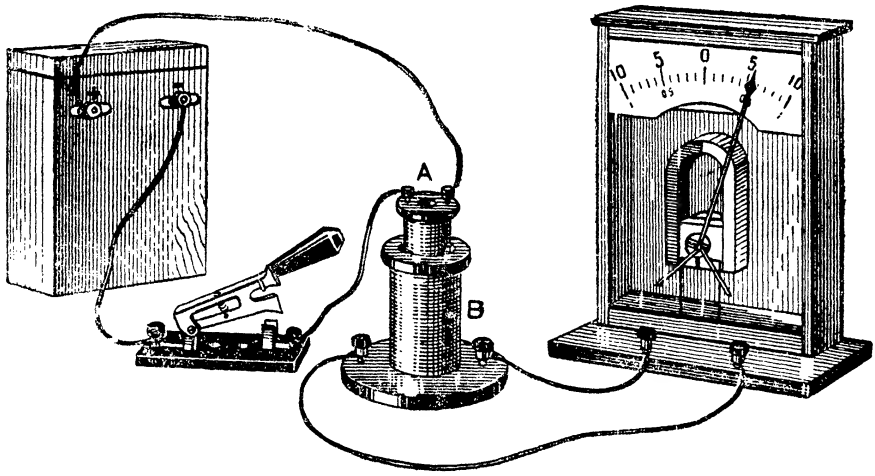


Рис. 163 Установка для обнаружения явления электромагнитной индукции.

Можно вызвать появление индукционного тока в катушке *B* и путём изменения тока в катушке *A* или движением этих катушек относительно друг друга.

Проделаем ещё один опыт. Поместим в магнитное поле подковообразного магнита плоскую катушку, концы которой соединим с гальванометром. При повороте катушки гальванометр отмечает появление в ней индукционного тока.

На основании рассмотренных нами опытов можно установить, что во всех случаях возникновения индукционного тока происходит изменение магнитного потока, пронизывающего площадь, охваченную проводником.

Действительно, при движении магнита относительно замкнутой на гальванометр катушки или катушки относительно магнита (рис. 162) магнитный поток, пронизывающий витки катушки, меняется: при движении магнита вниз он увеличивается, а при движении вверх уменьшается. В обоих случаях в витках катушки появляется ток.

Так же при замыкании и размыкании цепи в катушке A (рис. 163) или при изменении тока в ней меняется магнитный поток, пронизывающий витки катушки B, и во всех этих случаях в этой катушке обнаруживается ток.

Точно так же при повороте катушки в магнитном поле магнитный поток, пронизывающий площадь, охватываемую её витками, меняется, вследствие чего в ней возникает индукционный ток.

Если же магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, не меняется, то индукционный ток в контуре не возникает. В этом легко убедиться, перемещая поступательно замкнутый контур в однородном магнитном поле: ток в контуре при этом не возникает.

Итак, ***при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в последнем возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.***

В этом и заключается один из важнейших законов природы — закон электромагнитной индукции.

Возникающую в проводнике при индукции электродвижущую силу принято называть электродвижущей силой индукции.

Заметим, что для явления электромагнитной индукции характерной величиной является э. д. с. индукции, а не индукционный ток, который зависит от сопротивления проводника. В двух одинаковых по размерам и форме проводниках при одинаковых условиях э. д. с. будет одинакова, но индукционный ток будет больше в том проводнике, сопротивление которого меньше.

Введя понятие э. д. с. индукции, мы можем выразить закон электромагнитной индукции в более общем виде.

При всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур проводника, в последнем возникает э. д. с. индукции.

Явление электромагнитной индукции наблюдается и в незамкнутых проводниках. В этих случаях при пересечении проводником магнитных силовых линий на концах его возникает напряжение, причиной появления которого является та же самая э. д. с. индукции.

89. Объяснение возникновения э. д. с. индукции на основе электронной теории. Возникновение э. д. с. индукции можно объяснить на основании электронной теории. Допустим, что проводник AB (рис. 164) движется слева направо с некоторой скоростью v в однородном магнитном поле B, силовые линии которого направлены сверху вниз. Вместе с проводником движутся слева направо его электроны и положительно заряженные частицы. Согласно электронной теории, движение заряженных частиц образует электрический ток. На всякий же ток магнитное поле действует в направлении, определяемом правилом левой руки. Направление тока в данном случае является направлением движения проводника; оно обозначено на рисунке вектором v.

Применяя правило левой руки, найдём, что на положительно заряженные частицы проводника действует сила, направленная к концу проводника B, а на свободные электроны в проводнике действует сила, направленная к концу A. Но положительно заряженные частицы металла, образующие кристаллическую решётку, отклоняться полем не будут. Свободные же электроны сместятся в поле к концу проводника A. Следовательно, в части A проводника получится избыток электронов, а в части B — их недостаток. Между концами проводников A и B возникнет напряжение, которое и будет мерой э. д. с. индукции.

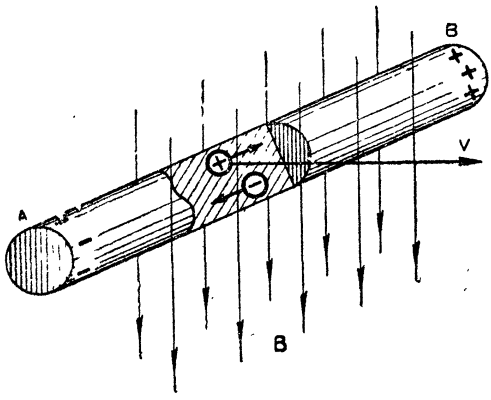


Рис. 164. К вопросу о возникновении э. д. с. индукции в проводнике.

Таким образом, э. д. с. индукции возникает и в незамкнутом проводнике при пересечении им силовых линий магнитного поля.

90. Направление индукционного тока. Закон Ленца. Индукционный ток в проводнике, в зависимости от условий его возникновения, имеет разное направление. Об этом мы могли судить по отклонению стрелки гальванометра, которое в одних опытах, описанных в § 88, происходило в одну сторону, в других — в другую.

Вопрос о направлении индукционного тока в самом общем виде был разрешён Ленцем.

Прежде чем сформулировать закон Ленца, рассмотрим направление тока в некоторых частных случаях индукции.

Возьмём два лёгких алюминиевых кольца, находящихся на острие подставки (рис. 165). Одно кольцо, A, сплошное, другое, B, имеет разрез. Если приближать и удалять магнит от разрезанного кольца, то можно заметить, что оно не взаимодействует с магнитом, так как индукционный ток в кольце не возникает. Двигая же магнит относительно сплошного кольца, мы обнаружим, что при приближении магнита кольцо отталкивается от него, при удалении притягивается.

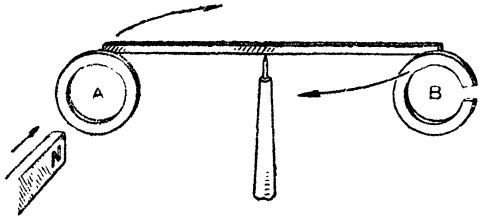


Рис. 165. При приближении магнита к сплошному кольцу оно отталкивается, а при удалении притягивается. Разрезанное кольцо не взаимодействует с магнитом.

На рисунке 166 схематически показано направление индукционного тока, возникающего в катушке при движении относительно неё магнита. Вертикальные стрелки здесь показывают направление движения маг-

нита относительно катушки, а стрелки на витках — направление индукционного тока, возникающего при этом в катушке. На рисунке 166, *а* мы видим, что когда к катушке приближается северный полюс магнита, то в ней возникает индукционный ток, она становится электромагнитом: на ближайшем к магниту конце катушки возникает северный полюс электромагнита (индукционный ток, если смотреть со стороны северного полюса, обтекает витки катушки против часовой стрелки).

Когда же северный полюс магнита (рис. 166, *б*) удаляется от катушки, то на ближайшем конце катушки возникает южный полюс. Аналогично при приближении к катушке южного полюса магнита (рис. 166, *в*) на ближайшем к нему конце катушки возникает южный полюс, а при удалении магнита (рис. 166, *г*) на этом конце возникает северный полюс.

Но мы знаем, что магниты, обращённые друг к другу одноимёнными полюсами, отталкиваются, а разноимёнными — притягиваются. Следовательно, когда индукционный ток в катушке возникает вследствие приближения к ней магнита, то силы взаимодействия между магнитом и индукционным током отталкивают магнит от катушки (рис. 166, *а*). Когда же магнит удаляется от катушки, то происходит притяжение их друг к другу (рис. 166, *б*).

Из рассмотренных опытов можно сделать следующий вывод: *индукционный ток, возникающий в проводнике, направлен так, что своим магнитным полем противодействует движению магнита и проводника относительно друг друга.*

Рассмотрим теперь случай, когда индукционный ток в катушке *B* возникает вследствие изменения тока в катушке *A*. Схематически этот случай изображён на рисунке 167, где каждая из катушек *A* и *B* изображена в виде одного витка.

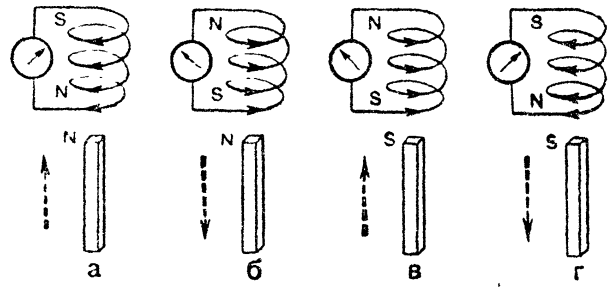


Рис. 166. К закону Ленца.

Опыт показывает, что при усилении тока в катушке *A*, т. е. при усилении магнитного поля, индукционный ток в катушке *B* имеет направление, противоположное току в катушке *A* (рис. 167, *а*). При уменьшении же тока в катушке *A*, т. е. при ослаблении магнитного поля, индукционный ток в катушке *B* имеет такое же направление, как и в *A* (рис. 167, *б*).

В первом случае магнитное поле индукционного тока катушки *B* направлено в сторону, противоположную магнитному полю катушки *A*, противодействуя его усилению. Во втором, наоборот,

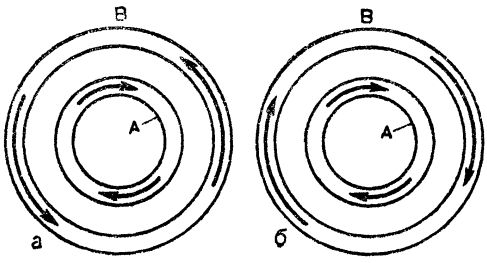


Рис. 167. К закону Ленца.

магнитное поле индукционного тока катушки B направлено в ту же сторону, что и поле в катушке A, противодействуя его ослаблению.

Все рассмотренные нами случаи направления индукционного тока находятся в полном соответствии с законом Ленца, который в самом общем виде формулируется следующим образом:

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Индукционный ток, как и всякий ток, обладает энергией. Следовательно, получая индукционный ток, мы тем самым получаем электрическую энергию; согласно закону сохранения и превращения энергии, последняя может быть получена только за счёт эквивалентного количества энергии какого-нибудь другого вида.

Когда мы приближаем, например, к катушке (рис. 166, *а*) магнит, то возникающий в ней индукционный ток своим магнитным полем отталкивает магнит. Двигая магнит, мы преодолеваем эти силы отталкивания, т. е. совершаем работу, в результате чего механическая энергия превращается в энергию индукционного тока.

При выдвигании магнита из катушки (рис. 166, *б*) совершается работа по преодолению силы притяжения катушки. Механическая энергия здесь также превращается в энергию индукционного тока.

Таким образом, закон Ленца находится в полном соответствии с законом сохранения и превращения энергии.

91. Величина электродвижущей силы индукции. Мы ознакомились с условиями, при которых в проводнике возникает э. д. с. индукции. Рассмотрим теперь, от чего зависит величина э. д. с. индукции. О величине её можно судить по индукционному току, который возникает в замкнутом контуре. Величина этого тока по закону Ома определяется величиной э. д. с. и сопротивлением цепи. Чем больше индукционный ток в данной цепи, тем, следовательно, больше э. д. с. индукции, возникшая в ней.

В опытах по индукции, описанных в предыдущих параграфах, можно подметить следующее очень важное обстоятельство: чем быстрее меняется магнитный поток, пронизывающий контур проводника, тем больший ток течёт по проводнику, тем, следовательно, большая э. д. с. индукции возникает в нём.

Так, например, чем быстрее движется магнит относительно катушки (см. рис. 162), тем больше угол, на который отклоняется стрелка гальванометра; следовательно, тем большей величины э. д. с. индукции возникает в катушке. При медленном движении

магнита магнитный поток, охватывающий витки катушки, изменяется медленно и возникающая в катушке э. д. с. мала по величине.

Таким образом, изменяя медленно или быстро магнитный поток, можно получить в проводнике различной величины э. д. с.

Если в момент времени t_1 магнитный поток, пронизывающий контур проводника, был Φ_1, а к моменту t_2 стал Φ_2, то за время $t_2 - t_1 = \Delta t$ магнитный поток изменился на величину $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$ [1].

Отношение $\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, показывающее изменение магнитного потока в единицу времени, называется *скоростью изменения магнитного потока*.

Измерения, производимые с различными проводниками при различных изменениях магнитного потока, показывают, что величина э. д. с. индукции, возникающей в проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Обозначая её буквой E, можно написать:

$$E = -k\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (1)$$

В этой формуле k — коэффициент пропорциональности, числовое значение которого зависит от того, в каких единицах измерены другие величины, входящие в равенство (1).

Знак минус в формуле э. д. с. индукции означает, что при возрастании магнитного потока, пронизывающего контур проводника $\left(\text{т. е. при } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$, э. д. с. индукции будет отрицательна, она создаёт индукционный ток, противодействующий магнитному потоку (см. § 90); при уменьшении магнитного потока (т. е. при $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$) э. д. с. положительна и ток будет поддерживать убывающий магнитный поток.

В системе СИ э. д. с. выражается в вольтах, поток индукции — в веберах, время — в секундах; коэффициент пропорциональности k в формуле (1) равен единице:

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2)$$

Если число витков в катушке n, а э. д. с., возникающая в каждом витке, равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ *в*, то полная э. д. с., возникающая в катушке при последовательном соединении всех витков, будет в n раз больше, т. е.

$$E = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ в.$$

В случае возникновения э. д. с. индукции в незамкнутом проводнике величина её, как показал Фарадей, определяется числом силовых линий, пересекаемых проводником в единицу времени.

[1] Значок Δ (греческая буква «дельта») употребляется для обозначения изменения какой-нибудь величины.

Определим э. д. с. индукции при передвижении проводника длиной $AB=l$ *м* со скоростью v $\frac{м}{сек}$ в однородном магнитном поле, индукция которого B $\frac{вб}{м^2}$, считая, что проводник движется перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля (рис. 164).

При скорости v $\frac{м}{сек}$ проводник длиной l *м* пересечёт в секунду площадь vl $м^2$. При индукции поля B число магнитных силовых линий, пересекаемых проводником в единицу времени, равно Blv. Поэтому возникшая в проводнике э. д. с. индукции $E=Bvl$ *в*.

При движении проводника не перпендикулярно к силовым линиям поля число пересечённых силовых линий будет меньше. В этом случае $E=Bvl\cdot\sin\alpha$, где α — угол между векторами индукции поля и скорости движения проводника.

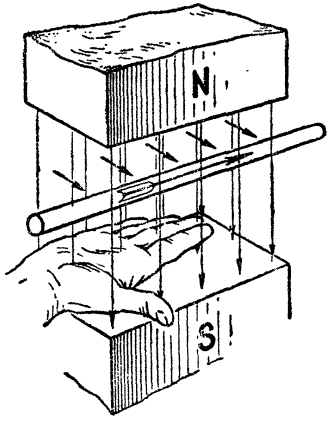


Рис. 168. Правило правой руки.

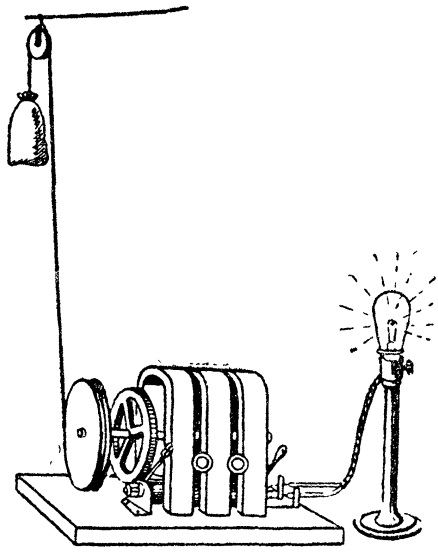


Рис. 169. К задаче 2.

92. Правило правой руки. В некоторых случаях для определения направления индукционного тока в проводнике удобно пользоваться правилом правой руки (рис. 168). Если расположить ладонь правой руки так, чтобы в неё входили силовые линии магнитного поля, а отставленный на 90° большой палец направить по направлению движения проводника, то положение четырёх пальцев руки определит направление индукционного тока в проводнике.

Упражнение 15.

1. С некоторой высоты свободно падает намагниченный стальной стержень. При своём движении он проходит сквозь отверстие в катушке с проволокой, концы которой замкнуты накоротко, и, выходя из неё, продолжает падение. Опишите изменения в движении магнита.

2. На рисунке 169 изображена установка, в которой груз при падении вращает машину, дающую электрический ток. Этим током можно питать несколько небольших лампочек, включённых параллельно. Когда лампочки все выключены, то груз, вращая машину, быстро падает вниз. Включая в цепь

машины по одной лампочке, можно заметить, что при каждом включении новой лампочки скорость падения груза уменьшается. Объясните это явление.

Если имеется в школе возможность, соберите такую установку и проделайте с ней опыт.

3. На рисунке 170 изображено сечение проводника, расположенного перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (проводник замкнут). Стрелкой показано направление движения проводника. Пользуясь правилом правой руки, определите направление индукционного тока в нём и докажите на этом случае индукции, что правило правой руки непосредственно вытекает из закона Ленца.

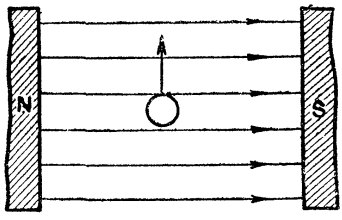


Рис. 170. К задаче 3.

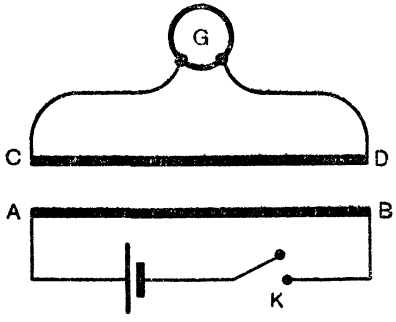


Рис. 171. К задаче 4.

4. На рисунке 171 изображены два проводника *AB* и *CD*. Проводник *AB* включён в цепь источника тока, концы же проводника *CD* присоединены к гальванометру. При замыкании и размыкании цепи проводника *AB* в проводнике *CD* возникает индукционный ток. Пользуясь законом Ленца, определите в каждом отдельном случае направление индукционного тока в проводнике *CD*.

93. Вихревые токи. Если в магнитном поле сильного электромагнита начнёт качаться массивный маятник, состоящий из стержня с толстой медной пластинкой на конце, то колебания такого маятника очень быстро прекратятся (рис. 172). Объясняется это следующим образом. При движении медной пластинки в магнитном поле она пересекает силовые линии поля, вследствие чего в ней возникают замкнутые индукционные токи. На рисунке показан мысленно выделенный контур *abcd*. При движении пластинки в пространстве между магнитами магнитный поток, пронизывающий этот контур, меняется. По закону Ленца, в контуре возникает индукционный ток *I*, который, взаимодействуя с магнитным потоком, тормозит движение маятника.

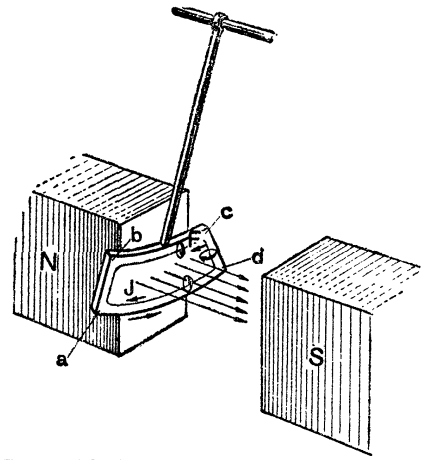


Рис. 172. Возникновение вихревых токов в медной пластинке.

Индукционные токи, возникающие в сплошных металлических массах, называются вихревыми токами. Вихревые токи образуются во всех проводниках, движущихся в магнитном поле тока или находящихся в переменном магнитном поле.

Так как сопротивление массивного проводника очень мало, то вихревые токи в нём могут достигнуть очень большой величины, вследствие чего проводник будет нагреваться. Вот почему во многих случаях важное значение имеют способы ослабления вихревых токов.

94. Самоиндукция. Весьма важное практическое значение имеет один частный случай явления электромагнитной индукции, получивший название самоиндукции. Познакомимся с этим явлением на опыте.

Составим цепь из источника постоянного тока и двух параллельных ветвей (рис. 173). В одну из ветвей включим последовательно лампу накаливания и реостат R, а в другую ветвь — такую же лампу и последовательно с ней катушку L с железным сердечником (электромагнит). При помощи реостата R мы можем сделать сопротивления обеих ветвей одинаковыми, а реостатом r создать нормальный накал ламп.

Если мы замкнём электрическую цепь, то заметим, что лампа, включённая последовательно с электромагнитом, загорится не сразу, волосок её будет медленно раскаляться, пока не достигнет нормальной яркости. Другая же лампа достигнет нормальной яркости практически сразу после замыкания цепи.

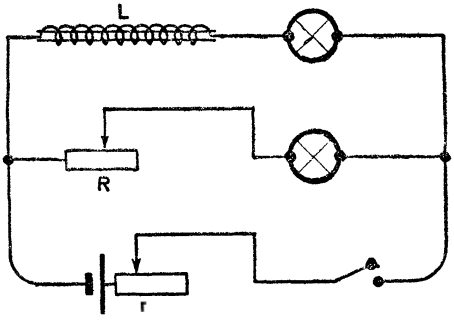


Рис. 173. Схема установки для наблюдения явления самоиндукции.

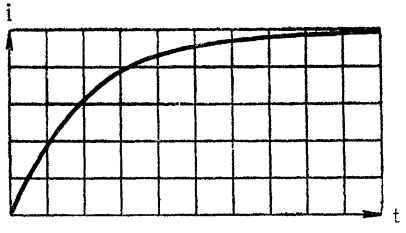


Рис. 174. График изменения тока в катушке при замыкании цепи.

Следовательно, при замыкании цепи электрический ток в катушке постепенно нарастает от нуля до некоторой постоянной величины.

На рисунке 174 показан график изменения тока в катушке при замыкании цепи с постоянной э. д. с.

Можно показать, что наблюдаемые в этом опыте явления обусловлены электромагнитной индукцией.

Действительно, когда в катушке возникает ток, то одновременно с ним возникает и магнитный поток, который растёт с увеличением тока. С изменением же магнитного потока в катушке индуктируется электродвижущая сила, величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Так как в данном случае проводник индуцирует э. д. с. в самом себе, то это явление называется самоиндукцией.

Электродвижущая сила, индуктированная в катушке под влиянием изменения её собственного магнитного потока, называется электродвижущей силой самоиндукции.

Согласно закону Ленца, во всё время роста магнитного потока, пронизывающего витки катушки, э. д. с. самоиндукции

в катушке направлена против э. д. с источника, включённого в данную цепь, и противодействует росту тока в цепи катушки.

Когда ток в катушке достигает постоянной величины, изменение магнитного потока прекращается и э. д. с. самоиндукции в катушке становится равной нулю

Включим теперь параллельно электромагниту одну лампочку. При отключении источника мы заметим, что лампочка, перед тем как погаснуть, ярко вспыхивает. Эта вспышка вызвана током, который течёт через лампу благодаря возникновению э. д с самоиндукции в электромагните при отключении его от источника. Величина этой э. д. с. самоиндукции может быть значительно больше э д. с. источника, питавшего цепь.

Для того чтобы выяснить направление э. д. с., возникающей в катушке при размыкании цепи, произведём ещё один опыт.

Включим гальванометр параллельно катушке L в цепь постоянного тока (рис. 175, *а*). При замыкании цепи через гальванометр пойдёт ток. Допустим, что стрелка гальванометра отклоняется при этом вправо.

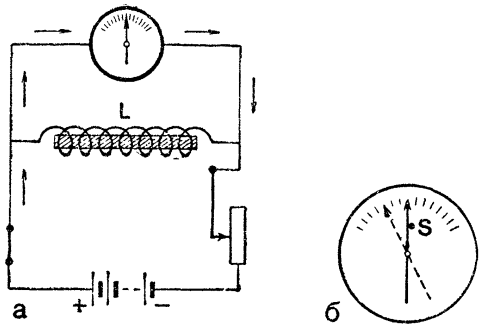


Рис. 175. Схема опыта, выясняющего направление э. д. с. самоиндукции.

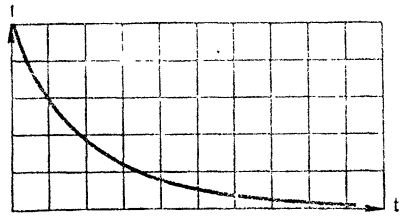


Рис. 176. График изменения индукционного тока.

Разомкнём цепь и поставим около стрелки задержку S (рис. 175, *б*) Когда вновь замкнём цепь, эта задержка не даст стрелке отклониться вправо. Разомкнув цепь, мы заметим, что стрелка гальванометра отклоняется влево, обнаруживая текущий по цепи ток, который не сразу исчезает в катушке, а постепенно, так, как показано на рисунке 176. Плавность исчезновения тока в катушке также объясняется возникновением в ней э. д. с самоиндукции При размыкании цепи вместе с током исчезает и его магнитное поле, что вызывает в катушке появление э д с., направление которой, согласно закону Ленца, одинаково с направлением тока Эта э д. с. и обусловливает ток в катушке ещё некоторое время после отключения источника постоянной э. д. с. В нашем опыте для этого имеются условия, так как контур, состоящий из катушки L и гальванометра, остаётся замкнутым и после размыкания цепи

Стрелка гальванометра при отключении источника отклоняется в сторону, противоположную по сравнению с первоначальным ее отклонением Оно указывает на то, что э. д. с. самоиндук-

ции в катушке действительно имеет то же направление, что и ток, текущий в ней до отключения источника.

Явление самоиндукции в электрических цепях можно сравнить с проявлением инертности в механике. Нельзя мгновенно увеличить скорость какого-нибудь тела от нуля до какой-нибудь заданной величины; невозможно также и мгновенно остановить движущееся тело, т. е. мгновенно уменьшить его скорость до нуля.

Аналогичные явления происходят и в электрической цепи. В момент замыкания ток не достигает сразу своей наибольшей величины, а нарастает постепенно (рис. 174). При размыкании же цепи ток не падает сразу до нуля (рис. 176).

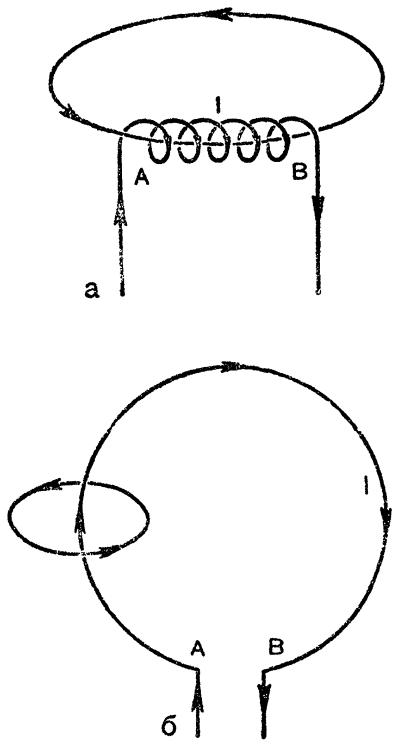


Рис. 177. Катушка обладает значительно большей индуктивностью, нежели виток провода той же длины.

Чем же вызываются эти явления? Они являются следствием того, что магнитное поле, всегда возникающее вместе с током, обладает свойством сохранять свою величину и направление, иными словами: *магнитное поле обладает инерцией.*

95. Индуктивность катушки. При самоиндукции, как и при всяком процессе электромагнитной индукции, индуктированная э. д. с. пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, по которому течёт ток. Величина же магнитного потока при отсутствии в катушке железа пропорциональна току, а скорость изменения потока пропорциональна скорости изменения тока $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$, создающего этот поток.

Таким образом, величина э. д. с. самоиндукции, возникающая в проводнике, пропорциональна скорости изменения тока в нём.

Если брать проводники разной формы, то окажется, что при одной и той же скорости изменения тока э. д. с. самоиндукции, возникающая в них, будет различна.

Так, если взять катушку AB (рис. 177, *а*), а затем эту же катушку растянуть в один виток (рис. 177, *б*), то при одинаковой скорости изменения тока в них э. д. с. самоиндукции в катушке будет больше.

Рассматривая рисунок, можно установить причину этого явления. Каждая силовая линия, пронизывая витки катушки, сцеп-

ляется с ней большее число раз, чем с одним витком. Поэтому при одинаковой скорости изменения тока в катушке и витке скорость изменения магнитного потока, сцепленного с катушкой, больше, чем скорость изменения магнитного потока, сцепленного с одним витком.

Величина, характеризующая связь между скоростью изменения тока в цепи и возникающей при этом э. д. с. самоиндукции, называется индуктивностью цепи.

Обозначим индуктивность буквой L; тогда зависимость величины э. д. с. самоиндукции от скорости изменения тока можно выразить следующей формулой:

$$E = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Отсюда

$$\text{ед. } L = \frac{\text{ед. } E \cdot \text{ед. } t}{\text{ед. } I}.$$

Полагая в этой формуле $\Delta t = 1$ *сек*, $\Delta I = 1$ амперу и $E = 1$ вольту, получим:

$$\text{ед. } L = 1\ \frac{в \cdot сек}{а}.$$

Эта единица называется генри (*гн*).

Следовательно,

$$1\ гн = 1\ \frac{в \cdot сек}{а}.$$

Итак, *генри есть индуктивность катушки, в которой изменение тока на 1 ампер в секунду возбуждает э. д. с. самоиндукции, равную 1 вольту.*

Для измерения малых индуктивностей применяются тысячные доли генри — миллигенри (*мгн*) и миллионные доли генри — микрогенри (*мкгн*).

Кроме того, часто применяется и другая единица — сантиметр индуктивности, причём 1 *мкгн* = 1000 *см* индуктивности. Таким образом,

$$1\ гн = 10^3\ мгн = 10^6\ мкгн = 10^9\ см.$$

Величина индуктивности катушки зависит от её размеров, формы и числа витков. Чем больше число витков в катушке самоиндукции, тем больше индуктивность катушки.

Индуктивность катушки сильно увеличивается при внесении внутрь её сердечника из железа или какого-либо другого магнитного материала.

Большой индуктивностью обладают обмотки электромагнитов у генераторов и двигателей. В момент размыкания цепи, когда скорость изменения тока $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ очень велика, в этих обмотках может возникнуть большая э. д. с. самоиндукции, которая, если не принять соответствующих мер, приведёт к пробою изоляции обмоток.

ГЛАВА IV

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

96. Получение переменного тока. Поместим в постоянное и однородное магнитное поле виток проволоки *abcd* (рис. 178).

При равномерном вращении этого витка вокруг оси *OO* магнитный поток, пронизывающий его площадь, будет непрерывно меняться как по величине, так и по направлению.

Вследствие этого, согласно закону электромагнитной индукции, в витке возникает переменная по величине и направлению э. д. с. индукции.

Когда плоскость вращающегося витка становится перпендику-

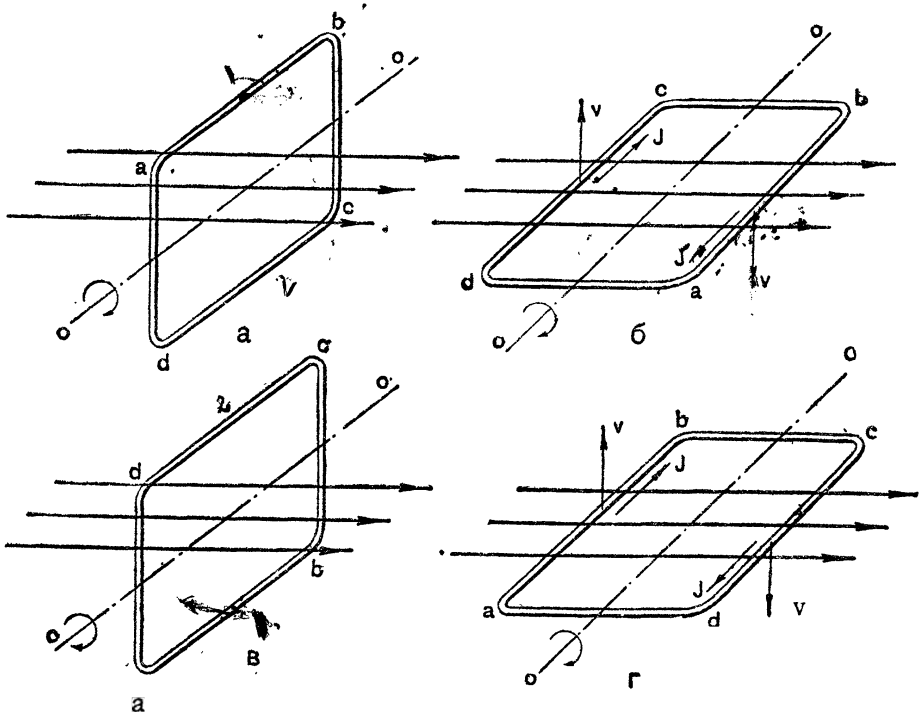


Рис. 178. Схема, объясняющая получение переменного тока в витке, вращающемся в однородном магнитном поле.

лярна силовым линиям магнитного поля (рис. 178, *а*), пронизывающий её магнитный поток наибольший ($\Phi=\Phi_{max}$), скорость же изменения его равна нулю $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=0\right)$, так как при прохождении через это положение проводники витка *ab* и *cd* скользят вдоль силовых линий поля, не пересекая их. Следовательно, э. д. с. индукции, возникающая в витке, которая пропорциональна скорости изменения потока, будет равна нулю ($E=0$).

Когда же плоскость витка параллельна силовым линиям поля (рис. 178, *б*), поток, пронизывающий её, равен нулю ($\Phi=0$), скорость же изменения его при прохождении через это положение наибольшая $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}max\right)$, так как проводники витка *ab* и *cd* движутся перпендикулярно к силовым линиям поля.

Э. д. с., возникшая в этом случае в витке, имеет наибольшее значение ($E=E_{max}=E_м$). В части *ab* витка э. д. с. будет направлена от чертежа к наблюдателю, а в части *cd*, наоборот,— от наблюдателя за чертёж. При дальнейшем повороте витка э. д. с., сохраняя неизменным направление, будет уменьшаться, и в положении, изображённом на рисунке 178, *в*, величина э. д. с. станет опять равной нулю ($E=0$), так как в этом положении при наибольшей величине магнитного потока, пронизывающего плоскость витка, скорость изменения его наименьшая.

При дальнейшем вращении витка скорость изменения потока, пронизывающего виток, будет увеличиваться; следовательно, э. д. с. по абсолютной величине будет возрастать от 0 до $E_м$ (рис. 178, *г*). Но так как виток движется теперь навстречу магнитным силовым линиям другой стороной плоскости, то направление э. д. с. в нём изменяется на противоположное: в части *ab* э. д. с. направлена от наблюдателя за чертёж, а в части *cd*, наоборот,— от чертежа к наблюдателю. Это направление э. д. с. сохранится и при дальнейшем движении витка, при этом абсолютная величина её будет убывать до нуля (рис. 178, *а*).

При последующих оборотах витка все эти явления будут повторяться вновь.

Таким образом, величина э. д. с. индукции во вращающемся витке за один его оборот изменяется от $-E_м$ до $+E_м$.

Разомкнём виток *abcd* и присоединим концы его к осциллографу (рис. 179, *а*). При вращении витка в магнитном поле *B* осциллограф запишет все изменения тока, по которым можно будет судить и об изменении э. д. с. индукции в витке. На рисунке 179, *б* показан график изменения э. д. с. в витке за время одного оборота. Вверху показаны последовательные положения витка в магнитном поле. против них (внизу) — значения э. д. с. индукции в витке. Направление силовых линий магнитного потока, пронизывающего виток, показано стрелками. Кружочки изображают сечение витка плоскостью чертежа с указанием направления тока в нём.

Ток, возникающий в витке при равномерном вращении его в однородном магнитном поле, как показывает осциллограмма, изображённая на рисунке 179, *а*, изменяется синусоидально. Такой ток называется переменным синусоидальным током.

Промежуток времени, в течение которого э. д. с. совершает одно полное колебание, называется периодом переменного тока.

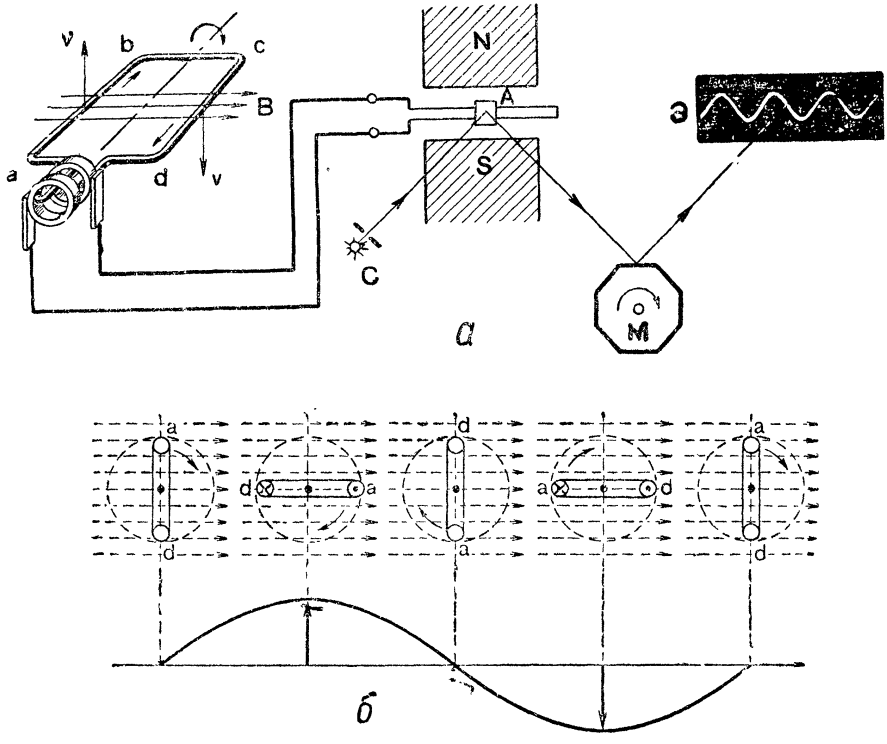


Рис. 179, *а* — схема установки для изучения переменного тока; *б* — график изменения э. д. с. в витке за время одного оборота.

Период колебания обозначают буквой T.

Число полных колебаний за 1 сек называется частотой тока и обозначается буквой f. Единица частоты называется герц (*гц*):

$$f=\frac{1}{T},$$

или

$$T=\frac{1}{f}.$$

Если значение э. д. с. в некоторый произвольный момент времени мы обозначим через e (мгновенное значение э. д. с.), а наибольшее значение её (амплитудное значение) — через $E_м$, то закон, выражающий зависимость e от времени, в случае сину-

соидального тока можно записать в виде следующего выражения:

$$e = E_м \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

В Советском Союзе и в большинстве других стран в промышленности и в быту применяют переменный ток частотой в 50 *гц*, продолжительность периода такого тока 0,02 секунды.

97. Генератор переменного тока. ***Машины, превращающие механическую энергию в энергию электрического тока, называются генераторами.*** Действие их основано на явлении электромагнитной индукции.

Простейшей схемой генератора может служить проводник в виде рамки, вращающейся вокруг оси *OO* в магнитном поле постоянного магнита или электромагнита (рис. 180). При вращении рамки в ней возникает переменная э. д. с.

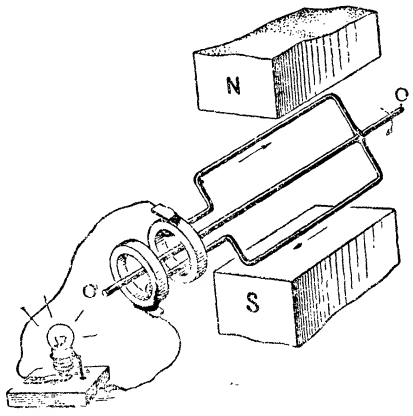


Рис 180. Простейшая схема генератора переменного тока.

Если рамку соединить с внешней частью цепи, то в цепи появится переменный ток. Для соединения рамки с внешней цепью используются кольца, укреплённые на той же оси, на которой укреплена и вращающаяся рамка. К кольцам присоединяются концы рамки, а над каждым кольцом устанавливаются неподвижные скользящие контакты — щётки. При вращении рамки за один оборот полярность щёток меняется два раза.

Мы рассмотрели на схеме принцип работы генератора переменного тока. Устройство генератора переменного тока значительно сложнее. С клемм генератора должно сниматься достаточно высокое напряжение; поэтому вместо одного витка приходится брать значительное их число и соответствующим образом соединять их между собой.

Однако такой тип генератора переменного тока с неподвижной магнитной системой (индуктором) и вращающимися витками (якорем), в которых возбуждается э. д. с., строится сравнительно редко. Это вызвано тем, что при помощи подвижных контактов практически невозможно отводить от генератора ток высокого напряжения из-за сильного искрения в подвижных контактах.

Поэтому почти во всех генераторах переменного тока обмотку (якорь), в которой индуктируется э. д. с., устанавливают неподвижно, а вращаться заставляют магнитную систему (индуктор).

Неподвижная часть машины получила название статора, а подвижная — ротора.

Статор генератора переменного тока собирается из листовой стали (для борьбы с вихревыми токами). В пазах, сделанных

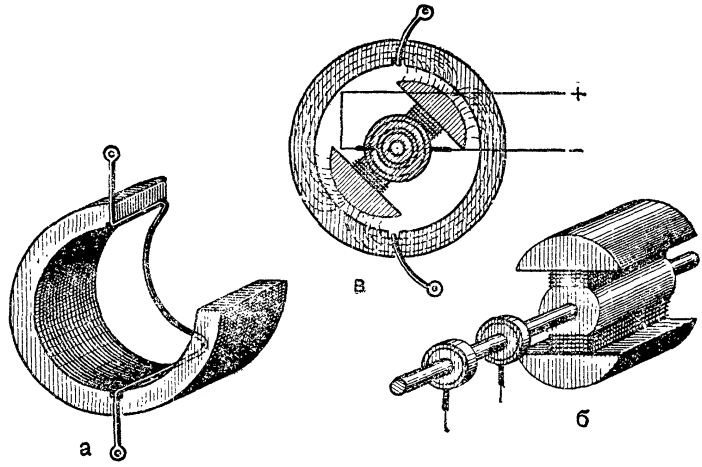


Рис. 181.

а — статор; *б* — ротор; *в* — схема генератора переменного тока.

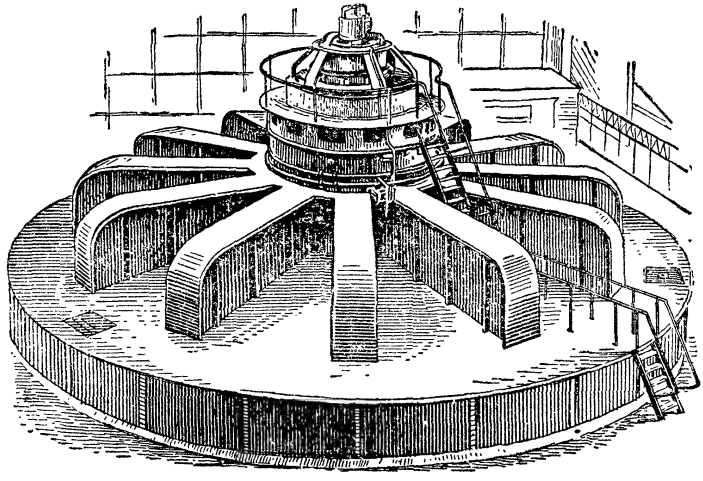


Рис. 182. Внешний вид гидрогенератора большой мощности.

во внутренней полости статора, укладываются проводники, в которых индуктируется э. д. с. (рис. 181, *а*). Вращающаяся электромагнитная система — ротор — имеет вид, показанный на рисунке 181, *б*. На магнитные полюсы ротора надеты обмотки, по которым пропускается постоянный ток. Этот ток подводится к обмотке через щётки и кольца от постороннего источника постоянного тока.

На рисунке 181, *в* показана полная схема генератора переменного тока, где отчётливо видно, что если ротор вращать

какой-либо внешней механической силой, то вместе с ним будет вращаться и создаваемое им магнитное поле. При этом силовые линии поля будут пересекать проводники, вложенные в пазы статора, и индуктировать в них э. д. с. Величина суммарной э. д. с. генератора будет зависеть от размера и типа обмотки статора, величины магнитного поля ротора и скорости его вращения.

На рисунке 182 изображён внешний вид мощного гидрогенератора Днепрогэса имени В. И. Ленина. Ротор генератора питается постоянным током, даваемым небольшой машиной постоянного тока, находящейся на одном валу с генератором.

Генератор, ротор которого вращается на общем валу с паровой турбиной, называется турбогенератором.

98. Величина переменного тока. Действующее (эффективное) значение тока и напряжения. Переменная э. д. с. вызывает в цепи переменный по величине и направлению ток.

Если цепь индуктивностью и ёмкостью не обладает, то ток в ней изменяется в соответствии с изменением э. д. с.

Наибольшему значению э. д. с. соответствует и наибольшее значение тока; и наоборот, когда э. д. с. равна нулю, ток также равен нулю. В этом случае принято говорить, что изменения э. д. с. и тока совпадают по фазе.

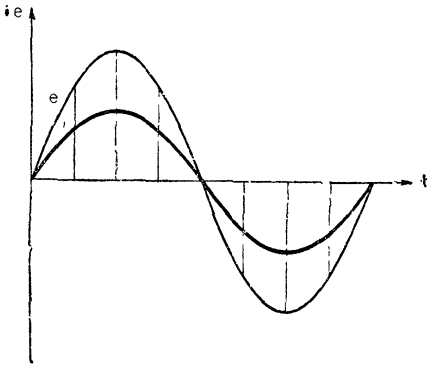


Рис. 183. Графики изменения переменных э. д. с. и тока.

Разделив, согласно закону Ома, значение э. д. с. $e=E_м \sin \frac{2\pi}{T} t$ на сопротивление цепи R, мы получим выражение тока в зависимости от времени:

$$\frac{e}{R}=\frac{E_м}{R} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

или

$$i=I_м \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где $i=\frac{e}{R}$ представляет собой мгновенное значение тока, а величина $I_м=\frac{E_м}{R}$ — его амплитудное (наибольшее) значение.

На рисунке 183 изображены две синусоиды: одна из них изображает изменение э. д. с., другая — тока. Обе эти кривые совпадают по фазе.

Сопротивление проводника, в котором напряжение и ток совпадают по фазе, называется активным сопротивле-

нием. В проводнике с активным сопротивлением энергия тока необратимо превращается в другие виды энергии (в механическую, во внутреннюю и др.).

Мгновенное значение переменного тока всё время изменяется, колеблясь между нулём ($i=0$) и некоторым наибольшим значением его ($i=I_м$). Тем не менее мы измеряем переменный ток, как и постоянный, в амперах. Так, например, мы говорим, что по лампочке идёт ток в 0,5 *а*, а по спиральке нагревательного прибора — ток в 5 *а* и т. д. О каком же значении переменного тока идёт здесь речь?

Очевидно, что средняя величина тока за полный период его изменения равна нулю, независимо от того, какие большие значения она принимает в различные моменты времени. Следовательно, ею нельзя оценивать величину переменного тока. Может быть, можно характеризовать переменный ток по его наибольшему (амплитудному) значению? Принципиально это возможно, но практически трудно построить прибор, непосредственно измеряющий эту величину тока.

При установлении значения величины переменного тока обычно исходят из таких его действий, которые не зависят от направления тока и могут быть вызваны также постоянным током. К ним относятся, например, тепловые действия тока. Действительно, если через проводник, обладающий некоторым сопротивлением, проходит ток I, то выделяемое в проводнике количество теплоты пропорционально I^2, т. е. не зависит от направления тока.

Пусть переменный ток проходит по проводнику данного сопротивления и в каждую секунду выделяет в нём некоторое количество теплоты. Очевидно, можно пропустить по этому проводнику такой постоянный ток, чтобы в секунду выделялось такое же количество теплоты, как и в случае переменного тока.

Значение постоянного тока, выделяющего в проводнике такое же количество теплоты, что и переменный ток (за одно и то же время), называется действующим (эффективным) значением переменного тока.

Для синусоидального переменного тока действующее значение его (I) меньше амплитудного ($I_м$) в $\sqrt{2}$ раза, т. е.

$$I=\frac{I_м}{\sqrt{2}}.$$

Точно так же действующее значение э. д. с. и напряжения меньше амплитудного их значения в $\sqrt{2}$ раза:

$$E=\frac{E_м}{\sqrt{2}}; \quad U=\frac{U_м}{\sqrt{2}}.$$

Рассмотренные нами в § 83 амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы (рис. 145), очевидно, не пригодны для измерений в цепях переменного тока, так как при каждом

изменении направления тока в катушке меняется и направление вращающего момента, поворачивающего стрелку прибора. Вследствие же большой инерции катушки и стрелки такой прибор не будет реагировать на переменный ток.

Для измерений тока и напряжения в цепях переменного тока применяются приборы, показания которых не зависят от направления тока. Для этой цели пригодны, например, тепловые приборы. В них поворот стрелки вызывается удлинением нити, которая нагревается током.

Пригодны для измерений в цепях переменного тока технической частоты ($f=50$ *гц*) и приборы электромагнитной системы (рис. 148). Подвижной частью приборов этой системы является небольшой железный диск, который, перемагничиваясь, всё время втягивается внутрь катушки, по которой идёт переменный ток.

99. Индуктивность и ёмкость цепи переменного тока. В предыдущем параграфе мы рассмотрели тепловое действие переменного тока, которым в равной степени обладает и постоянный ток. Однако быстрое изменение величины и направления тока обусловливает ряд особенностей переменного тока, отличающих его действия от действий постоянного тока.

Переменный ток, например, не годится для зарядки аккумулятора, его нельзя использовать и для технических применений электролиза.

Величина переменного тока зависит не только от напряжения и сопротивления цепи, но и от индуктивности проводников, включённых в цепь. В этом можно убедиться на следующем опыте. Включим в цепь постоянного тока катушку из многих витков медной проволоки и амперметр. Заметим по амперметру величину тока. Вдвинем теперь в катушку железный сердечник, ток при этом не изменится. Если включить теперь катушку в цепь переменного тока с действующим напряжением, равным напряжению постоянного тока, то ток в катушке окажется меньшим. Введение же в катушку железного сердечника приведёт к ещё большему ослаблению тока (рис. 184).

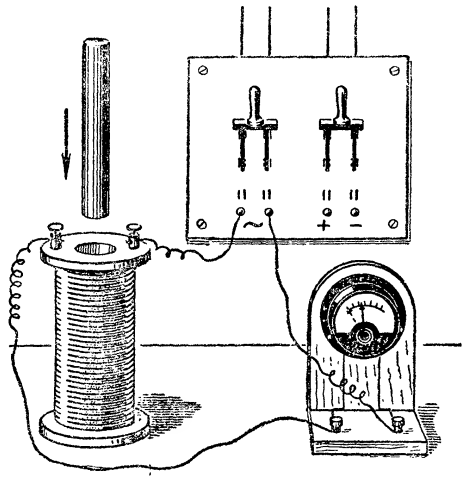


Рис. 184. Опыт, показывающий уменьшение переменного тока при увеличении индуктивности цепи.

Таким образом, индуктивность цепи переменного тока уменьшает величину тока.

Так как сопротивление цепи измеряется отношением напряжения к току, проходящему по ней, то можно сказать, что *наличие в цепи катушки индуктивности увеличивает сопротивление цепи.*

Причиной этого является возникающая в цепях переменного тока э. д. с. самоиндукции, которая препятствует нарастанию тока. Вследствие э. д. с. самоиндукции в момент, когда напряжение в цепи достигает максимума, ток не успевает достигнуть той величины, которую он достиг бы в отсутствие самоиндукции.

Рассмотрим следующий пример.

Одна из обмоток трансформатора, который часто можно встретить в школьных физических кабинетах, имеет 600 витков медной проволоки

диаметром 1 *мм*. На эту катушку пошло 150 *м* медной проволоки, сопротивление которой

$$R=0{,}0175\cdot\frac{150\cdot 4}{3{,}14\cdot 1}\approx 3{,}3 \text{ ома}.$$

Если измерить сопротивление этой катушки в цепи переменного тока частотой 50 *гц*, то окажется, что сопротивление её около 20 *ом*.

Итак, *индуктивность в цепи переменного тока действует в отношении величины тока так же, как сопротивление проводника цепи.*

С увеличением индуктивности растёт и сопротивление цепи.

Сопротивление, которым обладает цепь вследствие наличия в ней индук-

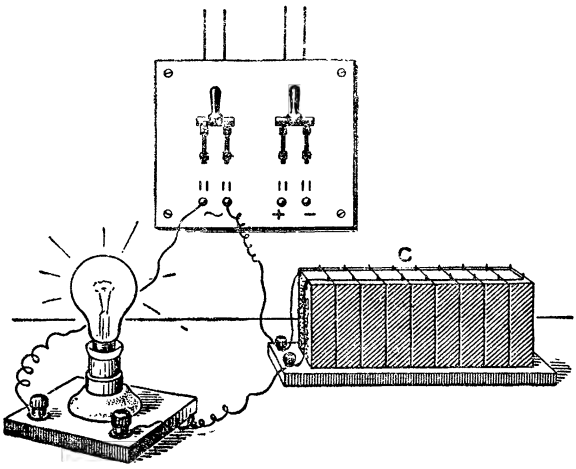


Рис. 185. Переменный ток проходит по цепи, в которую включён конденсатор. Лампочка горит тем ярче, чем больше ёмкость батареи конденсаторов *C*.

тивности, называется индуктивным сопротивлением. Величина индуктивного сопротивления зависит от индуктивности цепи L и частоты тока f. Рассчитывается индуктивное сопротивление по формуле:

$$x_L=2\pi fL, \text{ или } x_L=\omega L.$$

Если в цепь постоянного тока мы включим батарею конденсаторов, то никакого тока не обнаружим, что вполне понятно, так как пластины конденсатора отделены друг от друга изолятором. *Через конденсатор постоянный ток течь не может.*

Если же включить батарею конденсаторов в цепь переменного тока, то в цепи будет ток; электрическая лампочка, включённая в эту цепь, будет гореть (рис. 185).

В цепи переменного тока электроны совершают колебательное движение; это приводит к тому, что обкладки конденсаторов попеременно заряжаются то положительно, то отрицательно; электроны же в проводах цепи движутся то в одном, то в другом направлении. Если выключить конденсатор из цепи, то лампочка будет гореть ярче. Следовательно, *наличие конденсатора в цепи переменного тока увеличивает сопротивление цепи.*

Опыт показывает, что, чем больше ёмкость конденсатора, включённого в цепь, тем меньшее сопротивление он оказывает переменному току.

Сопротивление, которым обладает цепь вследствие наличия в ней ёмкости, называется ёмкостным сопротивлением. Величина ёмкостного

сопротивления зависит от ёмкости цепи и частоты тока. Рассчитывается ёмкостное сопротивление по формуле: $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$, или $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Наличие в цепи переменного тока индуктивности или ёмкости приводит к сдвигу фаз между током и напряжением. При индуктивном сопротивлении, вследствие появления в цепи э. д. с. самоиндукции, ток отстаёт по фазе от приложенного напряжения, а при ёмкостном сопротивлении ток по фазе опережает напряжение.

Если изменение напряжения в цепи происходит по закону $u = U_м \sin \frac{2\pi}{T} t$, то в случае наличия в этой цепи активного и индуктивного сопротивления изменение тока в ней выразится формулой: $i = I_м \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \varphi\right)$, где φ сдвиг фаз между напряжением и током. Графики напряжения и тока в этом случае будут иметь вид, изображённый на рисунке 185а.

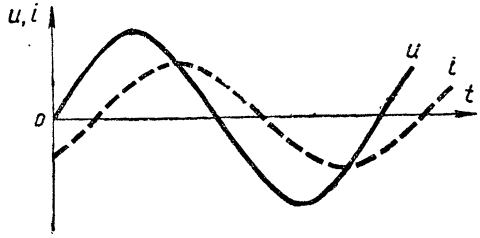


Рис. 185а. Графики изменения напряжения и тока в цепи с активным и индуктивным сопротивлением.

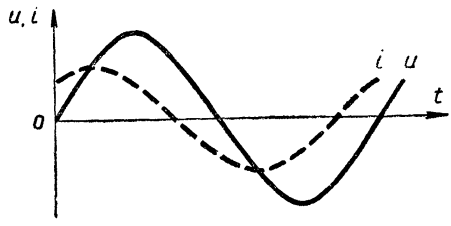


Рис. 185б. Графики изменения напряжения и тока в цепи с активным и ёмкостным сопротивлением.

При наличии в цепи активного и ёмкостного сопротивления изменение тока в цепи выразится формулой $i = I_м \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right)$. На рисунке 185б показаны графики напряжения и тока в этом случае.

100. Трёхфазный ток. Рассмотренный нами в § 96 переменный ток создавался одной э. д. с., возникшей в генераторе. Такой ток называется однофазным переменным током. Однако основной системой тока, принятой в настоящее время повсеместно, является система трёхфазного тока, обладающая, как мы увидим далее (§ 101), рядом преимуществ перед однофазной системой.

Трёхфазным током называется система трёх однофазных токов, создаваемых тремя э. д. с., имеющими одинаковые амплитуды и частоту, но сдвинутыми одна относительно другой по фазе на 120° или по времени на $^1/_3$ периода.

Каждая отдельная цепь трёхфазной системы сокращённо называется фазой.

Трёхфазную систему токов принципиально можно получить от трёх одинаковых генераторов переменного однофазного тока, роторы которых, находясь в одном и том же положении, жёстко связаны между собой и не меняют своего относительного поло-

жения при вращении. Статорные же обмотки генераторов повёрнуты относительно друг друга на 120° в сторону вращения ротора, как это показано на рисунке 186 (концы их обозначены буквами H и K). При этих условиях вполне очевидно, что э. д. с. второго генератора (E_2) будет запаздывать в своих изменениях относительно э. д. с. первого генератора (E_1) на 120°, т. е. макси-

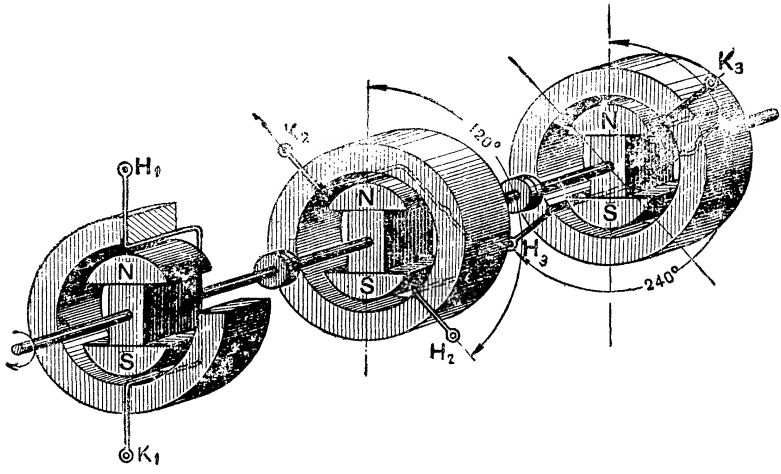


Рис. 186. Схема получения трёхфазного тока.

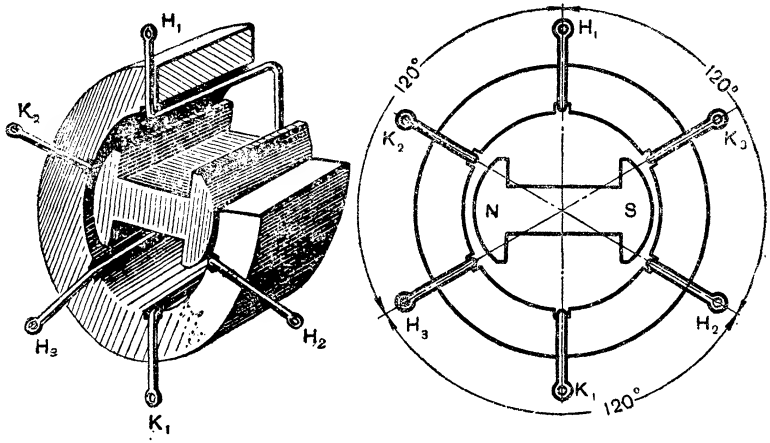


Рис. 187. Схема генератора трёхфазного тока.

мальное значение э. д. с. того же направления во втором генераторе наступит после того, как все роторы генераторов повернутся на 120°. Э. д. с. третьего генератора (E_3) также будет запаздывать относительно э. д. с. второго генератора на 120°.

Но такой способ получения трёхфазного тока оказывается технически сложным и экономически невыгодным. Гораздо проще все три статорные обмотки совместить в одном корпусе статора, что и представлено на рисунке 187. Начала обмоток

на этом рисунке обозначены буквами *Н*, концы — буквами *К*. Такой генератор называется генератором трёхфазного тока.

Таким образом, статор генератора трёхфазного тока имеет три обмотки (называемые фазами генератора), смещённые на 120° своими началами (или концами) одна относительно другой.

Ротор же генератора трёхфазного тока конструктивно одинаков с ротором генератора однофазного тока.

При вращении ротора во всех обмотках будут создаваться одинаковые по частоте и амплитуде э. д. с., но только они будут не одновременно достигать своих максимумов. Считая, что максимальная э. д. с. создаётся в момент прохождения центра северного полюса ротора под началом обмотки, нетрудно видеть, что максимум э. д. с. того же направления во второй обмотке наступит после поворота ротора на 120°, а максимум э. д. с. того же направления в третьей обмотке наступит после поворота ротора на 240° относительно первой.

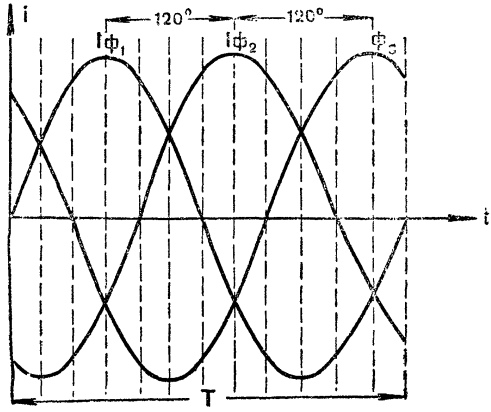


Рис. 188. График трёхфазного тока.

Соединяя каждую фазу генератора с внешней цепью, мы получим три цепи однофазного тока, не имеющие между собой никаких электрических соединений, причём токи в каждой отдельной цепи при одинаковом их сопротивлении будут равны по амплитуде, но сдвинуты по фазе друг относительно друга так же, как и э. д. с., на 120°.

График трёхфазного тока, записанный осциллографом, будет иметь вид, изображённый на рисунке 188.

Для соединения такого генератора с внешней цепью потребуется шесть проводов. С целью уменьшения числа проводов, идущих во внешнюю цепь, обмотки генератора и приёмников соединяют между собой, образуя электрически связанную трёхфазную систему. Такое соединение можно выполнить двумя способами: звездой и треугольником.

Оба эти соединения позволяют сэкономить материал на проводку при передаче заданной мощности в сравнении с расходом его при передаче той же мощности от трёх независимых однофазных генераторов.

101. Соединение звездой. Генератор трёхфазного тока на схемах принято рисовать в виде трёх статорных обмоток, расположенных под углом 120° друг к другу. Буквами *Н* и *К* обозначаются начала и концы соответствующих обмоток.

Если три конца статорных обмоток K_1, K_2, K_3 соединить в одну общую точку, называемую нулевой точкой O генератора, то получим такое соединение статорных обмоток, которое называется соединением звездой. К началам H_1, H_2, H_3 тех же обмоток подключаются провода линии, называемые линейными проводами (рис. 189, *а*). Аналогично могут соединяться и приёмники (рис. 189, *б*). Провод, соединяющий нулевую точку генератора O с нулевой точкой приёмников O, называется нулевым проводом.

Такая четырёхпроводная система трёхфазного тока имеет два разных напряжения. Напряжение между линейным и нулевым проводами, или, что то же самое, напряжение между началом и концом какой-нибудь обмотки статора называется фазным напряжением ($U_ф$).

Напряжение, измеряемое между двумя линейными проводами или между началами статорных обмоток, называется линейным напряжением ($U_л$).

Линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раза больше фазного:

$$U_л = \sqrt{3}\, U_ф.$$

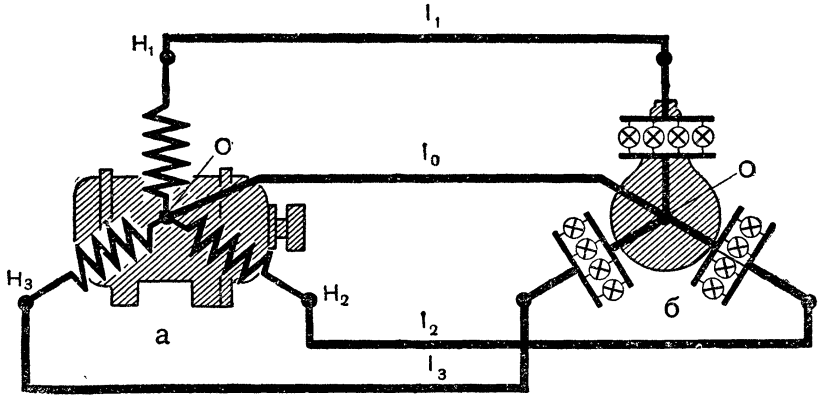


Рис. 189, *а* — соединение статорных обмоток звездой; *б* — соединение приёмников звездой.

Пример. Напряжение между линейными проводами трёхфазной системы, соединённой на звезду, 220 *в*. Чему равно фазное напряжение?

Решение:

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}; \quad U_ф = \frac{220\,в}{\sqrt{3}} \approx 127\ в.$$

Пример. Фазное напряжение трёхфазной системы, соединённой на звезду, 220 *в*. Чему равно напряжение между линейными проводами?

Решение:

$$U_л = \sqrt{3}\, U_ф; \quad U_л = 220\ в \cdot 1{,}73 \approx 380\ в.$$

В настоящее время во все новые жилые дома вводится трёхфазный ток с линейным напряжением в 220 *в* (например, в Москве, в черте города) и 380 *в* (в загородных линиях Москвы). Электрические же лампочки включают (на звезду) между линейными проводами и нулевым проводом (нулевой провод обязательно должен быть) соответственно на напряжение.

$$\frac{220\ в}{\sqrt{3}} \approx 127\ в \text{ и } \frac{380\ в}{\sqrt{3}} \approx 220\ в.$$

При одинаковой нагрузке фаз ток в нулевом проводе равен нулю (I_0) и этот провод становится излишним. С таким случаем мы встречаемся, например, при включении в цепь электродвигателя трёхфазного тока.

102. Соединение треугольником. Соединение треугольником называется такое соединение, при котором конец первой фазы генератора K_1 соединяется с началом второй его фазы H_2, конец второй фазы K_2 — с началом третьей фазы H_3 и, наконец, конец третьей K_3 — с началом первой фазы H_1; к вершинам полученного треугольника присоединяются провода линии (рис. 190, *а*). Аналогично соединяются и потребители (рис. 190, *б*).

Из рассмотрения рисунка 190 нетрудно заключить, что при соединении треугольником линейное и фазное напряжения одинаковы ($U_л = U_ф$).

103. Асинхронный двигатель. Введение в технику трёхфазного тока позволило создать простой по устройству и удобный в эксплуатации электродвигатель, который получил название асинхронного двигателя. Устройство асинхронного двигателя основано на использовании вращающегося магнит-

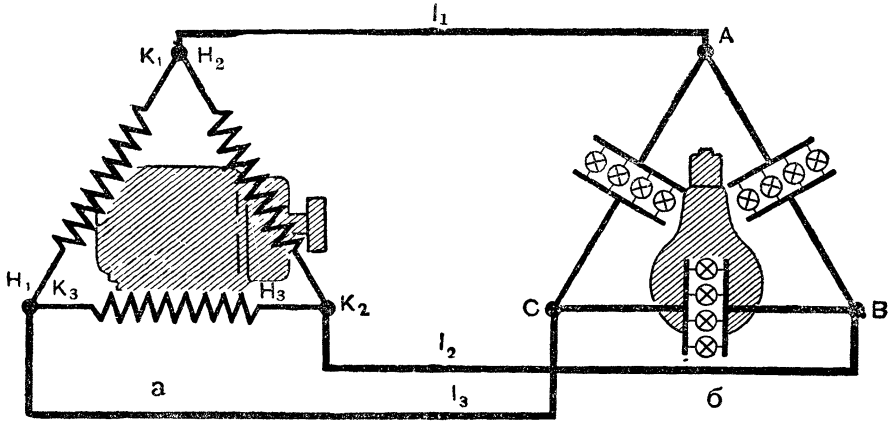


Рис. 190, *а* — соединение статорных обмоток треугольником; *б* — соединение приёмников треугольником.

ного поля. В простейшем случае такое поле можно получить, вращая подковообразный магнит. Магнитная стрелка, установленная на оси и расположенная вблизи магнита (рис. 191), начнёт при этом вращаться в ту же сторону, что и магнит, и с той же скоростью.

Если во вращающееся магнитное поле поместить замкнутый проводник, укреплённый на оси (рис. 192), то магнитное поле, при своём вращении пересекая стороны контура проводника, будет индуктировать в них э. д. с. индукции, создающую в этом замкнутом контуре индукционный ток. Этот ток, взаимодействуя с магнитным полем вращающегося магнита, приведёт виток во вращение. Направление вращения витка определяется правилом левой руки.

Вращение витка будет направлено в сторону вращения магнитного поля. Однако к разбору этого явления гораздо лучше подойти не с точки зрения формальных правил правой и левой руки, а на основе закона Ленца, вскрывающего физическую сущность этого явления.

Причиной появления индукционного тока в витке является вращение магнитного поля относительно витка. Следовательно, индукционный ток, согласно закону Ленца, будет противодействовать этому вращению поля. Но замедлить вращение магнитного поля он не может, так как оно определяется внешней механической силой, поэтому виток сам будет вращаться в сторону вращающегося магнитного поля. При этом относительная скорость пересечения магнитным полем сторон витка будет уменьшаться.

Если допустить, что виток достиг скорости вращения поля, то э. д. с., а следовательно, и ток в нём будут равны нулю и электромагнитная сила, создающая момент вращения, исчез-

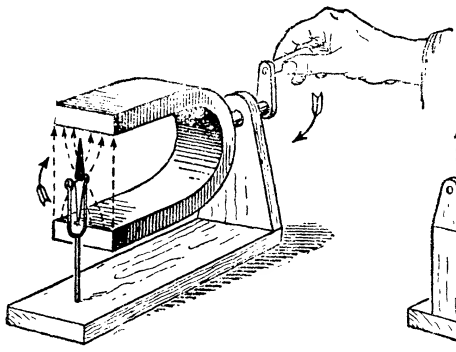


Рис. 191. Магнитная стрелка вращается в ту же сторону, что и магнит.

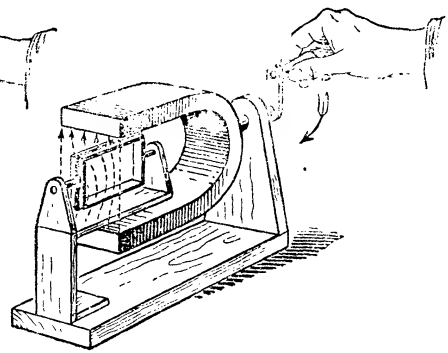


Рис. 192. Опыт, выясняющий принцип действия асинхронного двигателя.

нет. Поэтому виток, всегда находящийся под действием момента сил сопротивления (например, трения), начнёт останавливаться. Вследствие уменьшения скорости вращения витка его стороны снова будут пересекаться магнитным полем и снова возникнет вращающий момент, который при равномерном вращении всегда будет равен моменту силы сопротивления. ***Скорость вращения витка во вращающемся магнитном поле всегда меньше скорости вращения поля; поэтому принято говорить, что вращение витка относительно поля является асинхронным (неодновременным).***

Трёхфазные асинхронные двигатели состоят из двух основных частей: неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора.

Вращающееся магнитное поле создается в двигателе не путём механического вращения магнитных полюсов, а при обтекании переменным трёхфазным током неподвижных обмоток статора.

Если во вращающееся магнитное поле статора поместить на оси железный цилиндр (ротор), то в его теле, пронизываемом вращающимся полем, будут возникать индукционные токи. Эти

токи, взаимодействуя с вращающимся полем, по закону Ленца, вызовут вращение ротора в сторону поля со скоростью, меньшей скорости вращения поля.

Чтобы увеличить вращающий момент двигателя и уменьшить потери энергии на нагревание двигателя, необходимо, чтобы токи индуктировались не во всей толще ротора, а только на его поверхности. Для этого тело ротора делается не в виде сплошного цилиндра, а из отдельных стальных пластин толщиной 0,3—0,5 *мм*

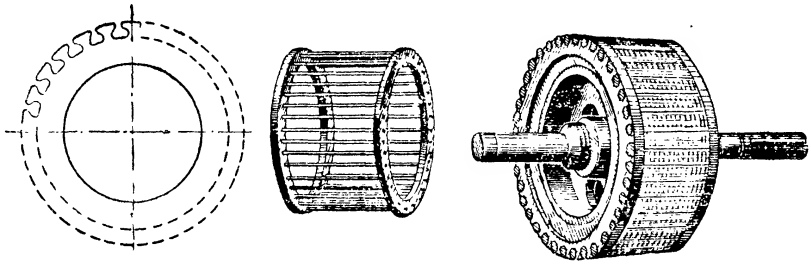


Рис. 193. Устройство ротора асинхронного двигателя.

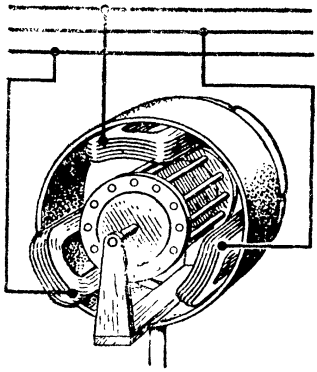


Рис. 194а. Схема включения трёхфазного электродвигателя в сеть.

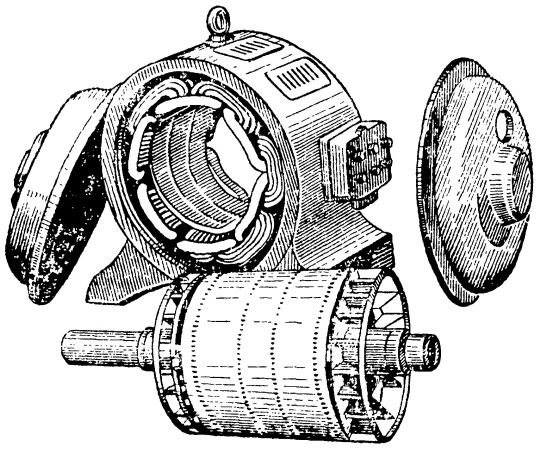


Рис. 194б. Основные детали трёхфазного асинхронного двигателя.

(рис. 193, *а*), изолированных друг от друга лаком или очень тонкой бумагой. В выштампованных пазах этих пластин укладываются медные или алюминиевые стержни. Эти стержни с обоих концов по торцам впаиваются в кольца (рис. 193, *б*), вследствие чего сам ротор называется короткозамкнутым (рис. 193, *в*), и так как его обмотка, взятая отдельно от тела ротора, имеет вид беличьего колеса (рис. 193, *б*), то этот простейший вид роторной обмотки называется «беличьим колесом».

На рисунке 194а показана схема включения трёхфазного асинхронного электродвигателя в сеть.

Следует помнить, что токи в роторе носят индукционный характер.

Асинхронный короткозамкнутый двигатель является очень простым и надёжным двигателем; он лишён коллектора или скользящих контактов; этим обусловлено его широкое распространение в промышленности и сельском хозяйстве. Изменение направления вращения двигателя достигается простым переключением двух каких-либо проводов, соединяющих обмотки статора с линией.

Асинхронный двигатель в разобранном виде показан на рисунке 194б.

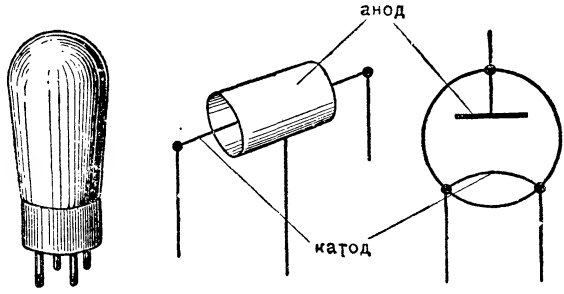


Рис. 195. Двухэлектродная лампа и её устройство.

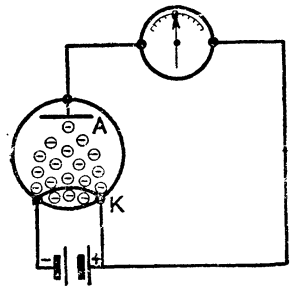


Рис. 196. При отсутствии напряжения между анодом и катодом около нити образуется «электронное облачко».

Система трёхфазного тока была разработана одним из выдающихся электротехников XIX и начала XX в.— русским инженером М. О. Доливо-Добровольским (1862—1919). Эта система открыла широчайшие возможности промышленного использования электрической энергии. Отметим два важнейших преимущества трёхфазной системы перед обычной однофазной системой переменного тока: 1) экономия в проводах линии, соединяющей станцию с потребителем; 2) возможность получения вращающегося магнитного поля, применяющегося в асинхронных электродвигателях.

104. Двухэлектродная электронная лампа. Электронными лампами называют обширный класс приборов, действие которых основано на явлении испускания электронов накалёнными металлами.

Область применения их чрезвычайно широка и разнообразна. Достаточно сказать, что радиотехника (радиовещание, радиолокация и телевидение), автоматика и телемеханика целиком базируются на работе этих приборов. В дальнейшем мы познакомимся с некоторыми практическими применениями электронных ламп.

На рисунке 195 показаны внешний вид и схема устройства простейшей двухэлектродной электронной лампы. Анод в этой

лампе представляет собой металлический цилиндр, по оси которого устанавливается нить накала — катод.

При накаливании нити током из неё вылетают электроны. Если напряжение между нитью и анодом равно нулю, то вылетевшие из нити электроны образуют вокруг неё своего рода «электронное облачко» (рис. 196). Оно удерживается около нити, которая из-за потери электронов заряжается положительно. Положительно заряженная нить не только удерживает вылетающие из неё электроны, но и втягивает их обратно. В конечном итоге между этими двумя процессами наступит подвижное равновесие, аналогичное тому, которое имеет место между насыщающим паром и жидкостью (при неизменной температуре). При таком равновесии среднее число электронов в облачке остаётся неизменным.

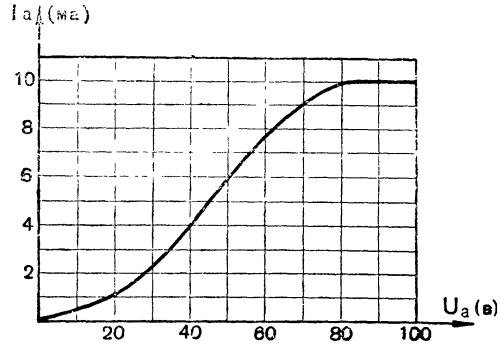


Рис. 197. График зависимости тока в анодной цепи от напряжения на аноде.

Если создать теперь в лампе электрическое поле, сделав нить K катодом, а пластинку A анодом, включив для этого в анодную цепь батарею на 80—100 *в*, то электроны из облачка устремятся к аноду: по анодной цепи лампы пойдёт ток.

Если при данном накале катода увеличивать напряжение между нитью и анодом, то всё большее и большее число электронов будет двигаться к аноду и, следовательно, всё меньшее число их будет возвращаться в нить. Ток в анодной цепи при этом будет возрастать.

При некотором напряжении между катодом и анодом все выбрасываемые нитью электроны будут увлекаться к аноду.

Если после этого ещё повышать напряжение, то ток уже не будет возрастать, так как нить при данной её температуре может выделять ежесекундно только определённое число электронов, которое и определяет наибольший ток. Такой ток называется **током насыщения**. График зависимости тока в анодной цепи от напряжения между анодом и нитью показан на рисунке 197. Этот график называется **анодной характеристикой лампы**.

Важным свойством электронной лампы является её *односторонняя проводимость:* электроны в ней движутся от нити к аноду, что соответствует направлению тока от анода к нити. Обратное направление тока невозможно, так как для обратного направления тока нужно было бы соединить электрод A с отрицательным полюсом источника тока, а в этом случае

электрическое поле будет отталкивать вылетающие из нити электроны.

Благодаря своей односторонней проводимости электронная лампа используется для выпрямления переменного тока, т. е. для преобразования переменного тока в постоянный.

104а. Устройство выпрямителей переменного тока. Выпрямителями переменного тока называются приборы, дающие возможность превращать переменный ток в ток прерывистый, пульсирующий, постоянного направления, который с помощью специальных устройств (фильтров) может быть сделан не только постоянным по направлению, но и по величине.

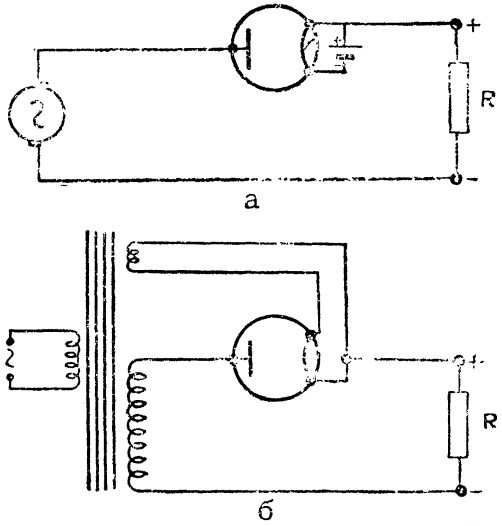


Рис. 198. Схема установки для выпрямления переменного тока с помощью электронной лампы.

Большинство выпрямителей основано на применении приборов, обладающих односторонней проводимостью. Через эти приборы свободно проходит ток одного направления и почти не проходит ток противоположного направления.

Для выпрямления переменного тока широко используется двухэлектродная электронная лампа. На рисунке 198 изображена схема включения электронной лампы в цепь переменного тока. Источник переменного тока может быть включён в анодную цепь лампы непосредственно (рис. 198, *а*) или же через трансформатор (рис. 198, *б*).

Каждый раз, когда анод имеет положительный потенциал по отношению к катоду, через лампу и участок цепи с сопротивлением R проходит ток. Когда же анод имеет потенциал отрицательный, ток отсутствует. Таким образом, через проводник с сопротивлением R ток проходит только в течение каждого положительного полупериода напряжения, приложенного к выпрямителю.

Ток, протекающий через проводник с сопротивлением R, представляет собой пульсирующий ток постоянного направления. На рисунке 199 верхняя кривая изображает переменный ток, а нижняя — выпрямленный пульсирующий ток.

Для использования обоих полупериодов переменного тока применяются схемы двухполупериодного выпрямления. На рисунке 200 изображена такая схема с двумя лампами, а на ри-

сунке 201 показана кривая пульсирующего тока, проходящего через проводник R. Когда верхний вывод A вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал, а нижний вывод B — отрицательный, работает верхняя лампа. В следующий полупериод, когда знаки потенциалов на этих обмотках

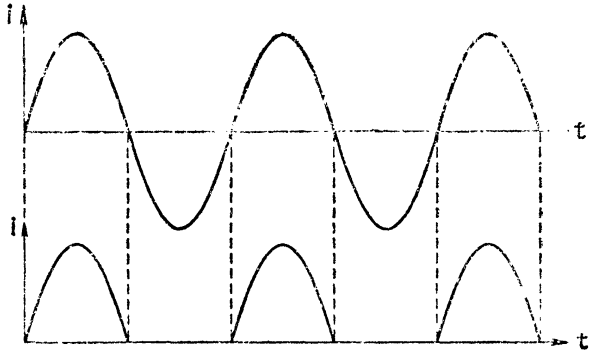


Рис. 199. Графики переменного (верхняя кривая) и выпрямленного (пульсирующего) тока.

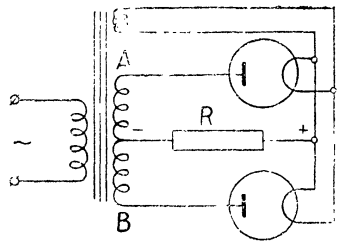


Рис. 200. Схема двухполупериодного выпрямителя.

изменяются, работает нижняя лампа. Через проводник с сопротивлением R ток в течение любого полупериода проходит в одном и том же направлении. Таким образом, используются оба полупериода подводимого к лампе переменного напряжения.

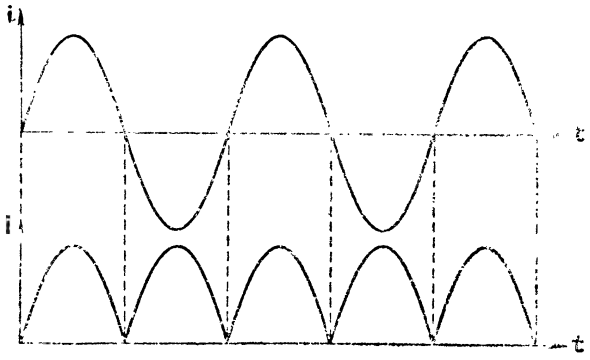


Рис. 201. График переменного тока (верхняя кривая) и график пульсирующего тока при двухполупериодном выпрямлении.

Двухэлектродная лампа, служащая для выпрямления переменного тока, называется кенотроном.

Кенотрон обладает идеальной односторонней проводимостью, однако сопротивление его очень велико, поэтому кенотронные выпрямители применяются главным образом для питания радиоустановок, не требующих значительных по величине токов.

Широкое применение в практике получили полупроводниковые выпрямители. Выпрямляющее действие полупроводникового выпрямителя основано на том, что сопротивление его различно в зависимости от направления (полярности) приложенного напряжения.

На рисунке 202 показана схема устройства и включения в цепь полупроводникового выпрямителя. Выпрямитель такого типа состоит из металла M и полупроводника P, разделённых весьма тонким слоем Z особого вещества (толщиной порядка 10^{-5} *мм*). Этот слой называется запирающим слоем. Металли-

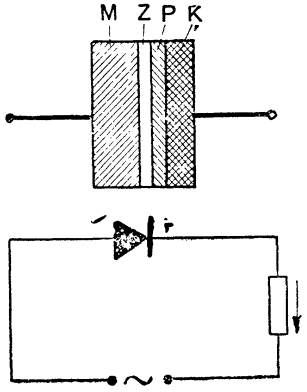


Рис. 202. Схема устройства (вверху) и включения полупроводникового выпрямителя.

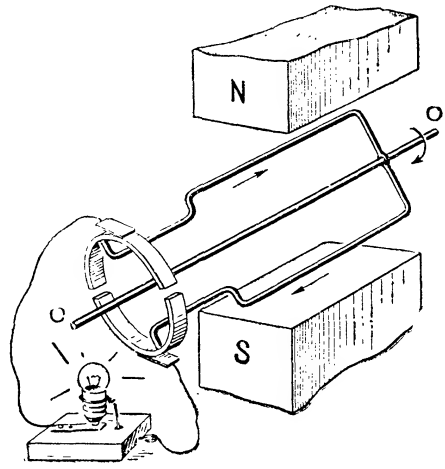


Рис. 203. Принцип устройства генератора постоянного тока.

ческая пластина K служит для образования контакта с полупроводником.

Процессы, происходящие в запирающем слое при прохождении через него переменного тока, рассмотрены в приложении. Его особенностью является односторонняя проводимость. При положительном потенциале на полупроводнике P электрический ток проходит через выпрямитель, при отрицательном же потенциале ток не проходит.

В практике применяются меднозакисные (купроксные) выпрямители с запирающим слоем, образующимся при создании закиси меди на медной пластинке, между закисью меди и медью. В последнее время стали широко применяться селеновые выпрямители с запирающим слоем, образующимся при специальной обработке между селеном и нанесённым на него металлом.

Мы рассмотрели типы выпрямителей, которые часто можно встретить в физических кабинетах школ. Мощность их сравнительно невелика. В технике применяются выпрямители, позво-

ляющие выпрямлять переменные токи высоких напряжений и больших мощностей.

105. Генератор постоянного тока. Постоянный ток может быть получен также от специального генератора постоянного тока.

Мы видели (§ 96), что э. д. с. в витке, вращающемся в магнитном поле, дважды меняет своё направление за один оборот витка. Для получения во внешней цепи постоянного по направлению тока применяют особое механическое переключающее устройство — коллектор.

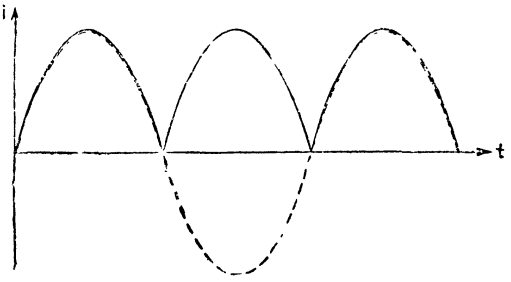


Рис. 204. График изменения тока в цепи генератора постоянного тока.

В простейшем случае коллектор представляет собой два изолированных друг от друга полукольца, к которым прикрепляются концы витка. Полукольца укрепляются на оси и вращаются вместе с витком, касаясь при этом неподвижных щёток (рис. 203).

В те моменты, когда ток в витке меняет направление, полукольца меняют щётки. Поэтому во внешней цепи ток будет иметь всё время одно и то же направление, но он будет меняться по величине. График изменения тока во внешней цепи, соединённой с генератором, изображён на рисунке 204. Пунктирной синусоидой изображён ток в витке; *сплошной линией изображён* ток во внешней цепи.

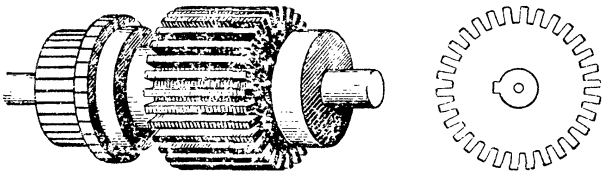


Рис. 205. Сердечник якоря генератора постоянного тока.

Применяя вместо одного большее число витков, можно получить постоянный ток, график которого будет представлять собой почти прямую, параллельную оси времени. Коллектор в этом случае будет состоять из многих изолированных друг от друга пластин.

Обмотка якоря современного генератора постоянного тока представляет собой очень сложную замкнутую систему, состоящую из большого числа секций с отпайками к коллекторным пластинам от каждой секции.

Тело якоря имеет вид цилиндра, укреплённого на оси и собранного из отдельных стальных пластин толщиной 0,3—0,5 *мм*, изолированных друг от друга тонкой бумагой или лаком. В выштампованных пазах укладывается обмотка якоря. Якорь без обмотки представлен на рисунке 205, а якорь в собранном виде изображён на рисунке 206.

Станина генератора постоянного тока изготовляется из литой стали или чугуна. На внутренней её части укрепляются полюсные сердечники, сделанные из листовой стали (рис. 207). На полюсные сердечники надеваются обмотки возбуждения, создающие магнитный поток в машине, который проходит по станине и телу якоря. Вся эта система образует индуктор. Ток в обмотки возбуждения поступает из якоря машины. При вращении якоря проводники, уложенные в его пазах, пересекают силовые линии магнитного поля, создаваемого обмотками возбуждения, и в них возникает э. д. с., а при наличии внешней замкнутой цепи — индукционный ток.

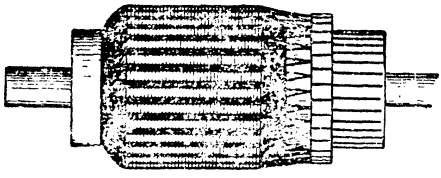


Рис. 206. Якорь генератора постоянного тока.

По закону Ленца, индукционный ток противодействует причине, его вызывающей. Такой причиной является движение якоря; следовательно, индукционный ток в якоре противодействует вращению якоря. На преодоление этого противодействия и расходуется механическая энергия теплового или гидравлического двигателя.

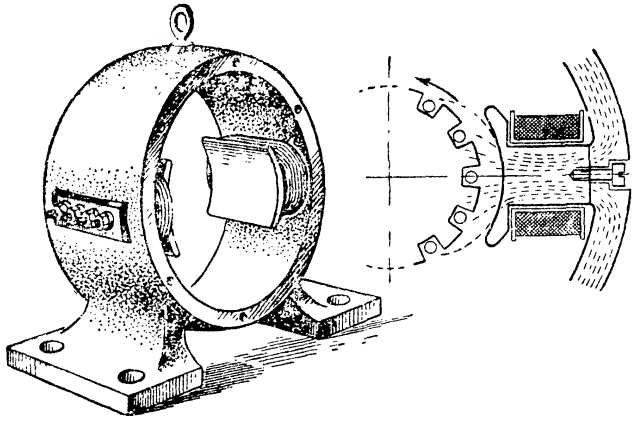


Рис. 207. Станина генератора постоянного тока.

Если обмотку возбуждения и якорь генератора постоянного тока приключить к постороннему источнику постоянного напряжения, то якорь придёт во вращение. Генератор превратится в электродвигатель. Это свойство генератора постоянного тока называется обратимостью.

Двигатели постоянного тока находят широкое применение на транспорте. Электрифицированные железные дороги, метро, трамвай, троллейбусы работают на двигателях постоянного тока.

106. Передача электрической энергии. Преимущество электрической энергии перед другими видами энергии заключается глав-

ным образом в том, что передачу её можно осуществлять с относительно малыми потерями на большие расстояния. Шатурская станция, например, передаёт электрическую энергию в Москву по линии длиной 130 *км*; линия передачи Свирской электростанции, посылающей энергию в Ленинград, имеет протяжение около 250 *км*; для использования в Москве энергии Волжских гидроэлектростанций имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС приходится передавать электрический ток на значительно бо́льшие расстояния.

При передаче электроэнергии на расстояние неизбежны потери энергии в линии передачи, так как ток, проходя по проводам линии, нагревает их. Энергия тока, идущая на нагревание проводов линии передачи, является потерянной энергией.

Чтобы передача электрической энергии была экономически выгодной, необходимо потери на нагревание проводов сделать возможно малыми. Как это осуществить?

Закон Джоуля — Ленца указывает два различных пути решения этой задачи. Один путь — уменьшить сопротивление проводов линии передачи, что можно сделать, взяв провода с большим сечением. Выясним на примере, осуществимо ли это практически.

Пусть на электростанции установлен генератор постоянного тока мощностью 200 *квт*, создающий напряжение 120 *в*. Требуется передать вырабатываемую генератором энергию на расстояние 10 *км* от станции. Какого сечения нужно взять провода, чтобы потери в линии передачи не превышали 10% от передаваемой мощности?

Ток, протекающий в линии передачи, определится из равенства:

$$I=\frac{P}{U};\quad I=\frac{200\,000\ вт}{120\ в}\approx 1665\ а.$$

Потеря мощности в линии $P_1=20$ *квт* (10% от 200 *квт*).
По потере мощности находим сопротивление линии:

$$P_1=I^2R;\quad R=\frac{P_1}{I^2};\quad R=\frac{20\,000\ вт}{(1665\ а)^2}\approx 0{,}0072\ ом.$$

По формуле $R=\rho\frac{l}{S}$ найдём площадь сечения проводов:

$$S=\rho\frac{l}{R};\quad S=\frac{0{,}0175\ \frac{ом\cdot мм^2}{м}\cdot 2\cdot 10\,000\ м}{0{,}0072\ ом}=48\,500\ мм^2.$$

Один метр такого провода весит 435 *кГ*, а вес провода для всей линии составил бы 8700 *Т*. Практически это значит, что такой способ передачи энергии невозможен.

Другой путь, ведущий к уменьшению потерь энергии в линии передачи, заключается в уменьшении тока в линии передачи.

Но при данной мощности уменьшение тока возможно лишь при увеличении напряжения.

Пусть теперь та же мощность в 200 *квт* передаётся при напряжении 12 000 *в*.

Ток в линии передачи определится из равенства:

$$I=\frac{200\,000}{12\,000}\approx 16{,}65\ а$$

Так как величина тока уменьшилась в 100 раз, то при тех же потерях мощности в линии передачи, рассчитываемой по формуле $P_1=I^2R$, сопротивление линии передачи увеличится в 100^2 раз.

Сечение же проводов линии в 100^2 раз уменьшится и станет равным:

$$S=\frac{48500\ мм^2}{100^2}=4{,}85\ мм^2.$$

В 100^2 раз уменьшится и вес меди, идущей на изготовление провода. Передача энергии станет практически возможной.

Таким образом, ***при передаче электроэнергии на большие расстояния необходимо пользоваться высоким напряжением.***

На практике при передаче энергии на большие расстояния пользуются напряжениями в 3300, 6600, 110 000, 160 000, 220 000 *в*.

Чем длиннее линия передачи, тем более высокое напряжение используется в ней. Днепровская гидроэлектростанция передаёт ток под напряжением 160 000 *в*, Свирская станция — 220 000 *в*. Передача электроэнергии новых мощных гидроэлектростанций проектируется под ещё бо́льшим напряжением — 400 000 *в* и выше.

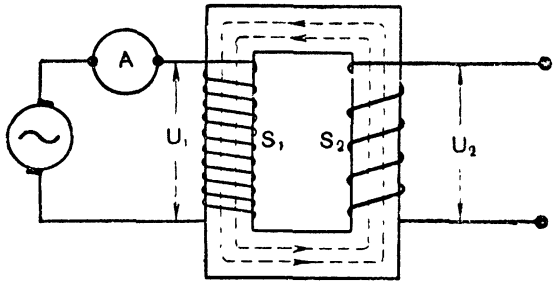


Рис. 208. Схема устройства трансформатора (холостой ход).

Генераторы переменного тока обычно строят на 2200, 6600, 11 000, 13 200 *в*. Постройка генераторов на более высокие напряжения затруднительна; в этих случаях потребовалось бы особо высокое качество изоляции всех частей генератора, находящихся под током, выполнение этого связано с большими техническими трудностями и экономически невыгодно.

Поэтому при передаче энергии на большие расстояния приходится повышать напряжение тока, получаемого от генераторов, что осуществляется при помощи трансформаторов.

107. Трансформатор. В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Сердечник технического трансформатора состоит из отдельных стальных пластин, собранных в замкнутую раму той или иной формы (рис. 208). На сердечнике помещены две обмотки (S_1 и S_2) с числом витков w_1 и w_2. Обмотки обладают незначительным сопротивлением и большой индуктивностью.

Приложим к концам обмотки S_1, которую будем называть первичной, переменное напряжение U_1 (от сети или генератора). По обмотке пойдёт переменный ток I, который намагнитит сталь сердечника, создав в нём переменный магнитный поток.

Намагничивающее действие тока пропорционально числу ампервитков (Iw_1).

По мере нарастания тока будет расти и магнитный поток в сердечнике, изменение которого возбудит в витках катушки э. д. с. самоиндукции. Как только э. д. с. самоиндукции достигнет величины приложенного напряжения, рост тока в первичной цепи прекратится. Таким образом, в цепи первичной обмотки трансформатора будут действовать приложенное напряжение U_1 и э. д. с. самоиндукции E_1. При этом напряжение U_1 больше E_1 на величину падения напряжения в обмотке, которое очень мало. Следовательно, приближённо можно написать:

$$U_1 = E_1. \tag{1}$$

Переменный магнитный поток, возникающий в сердечнике трансформатора, пронизывает и витки вторичной обмотки трансформатора, возбуждая в каждом витке этой обмотки такую же по величине э. д. с., как и в каждом витке первичной обмотки.

Так как число витков в первичной обмотке w_1, а во вторичной обмотке w_2, то индуктированные в них э. д. с. будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} E_1 &= w_1 e, \\ E_2 &= w_2 e, \end{aligned} \tag{2}$$

где e — э. д. с., возникающая в одном витке.

Напряжение же U_2 на концах разомкнутой вторичной обмотки равно э. д. с. в ней, т. е.

$$U_2 = E_2. \tag{3}$$

Из равенств (1), (2) и (3) следует, что ***величина напряжения на концах первичной обмотки трансформатора так относится к величине напряжения на концах вторичной обмотки, как число витков первичной обмотки относится к числу витков вторичной обмотки:***

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k. \tag{1}$$

Постоянная величина k называется коэффициентом трансформации трансформатора.

В том случае, когда нужно повысить напряжение, вторичная обмотка устраивается с большим числом витков (повышающий трансформатор); в случае же, когда надо понизить напряжение, вторичная обмотка трансформатора берётся с меньшим числом витков (понижающий трансформатор).

Пока вторичная обмотка разомкнута (тока в ней нет), трансформатор работает вхолостую. При холостом ходе он потребляет небольшую энергию, так как ток, намагничивающий стальной сердечник вследствие большой индуктивности катушки, очень

мал. Передача энергии из первичной цепи во вторичную при холостом ходе отсутствует.

Нагрузим наш трансформатор, замкнув через реостат цепь вторичной обмотки его (рис. 209). По ней теперь пойдёт индукционный ток, обозначим его буквой I_2. Этот ток, согласно закону Ленца, вызовет уменьшение магнитного потока в сердечнике. Но ослабление магнитного потока в сердечнике приведёт к уменьшению э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке и к нарушению равновесия между напряжением U_1, даваемым генератором на первичную обмотку, и э. д. с. самоиндукции E_1. В результате этого в первичной обмотке ток увеличится на какую-то величину I_1 и станет равным $I+I_1$. Вследствие увеличения тока магнитный поток в сердечнике трансформатора возрастёт до прежней величины и нарушенное равновесие между U_1 и E_1 снова восстановится. Таким образом, появление вторичного тока I_2 вызывает увеличение тока в первичной обмотке на величину I_1, которая определит нагрузочный ток первичной обмотки трансформатора. Так как намагничивающее действие тока пропорционально числу ампервитков Iw, то соотношение между нагрузочными токами I_1 и I_2 определится из равенства:

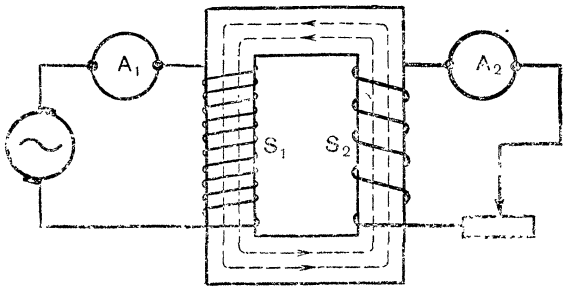


Рис. 209. Схема нагруженного трансформатора.

$$I_1 w_1 = I_2 w_2,$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}, \qquad (2)$$

т. е. ***нагрузочные токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков в них.***

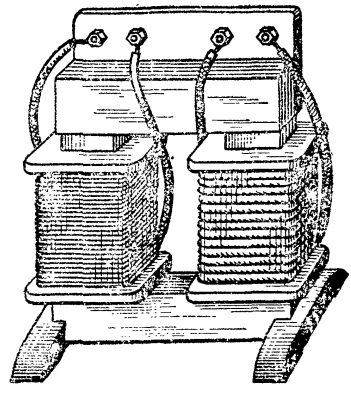


Рис. 210. Внешний вид трансформатора небольшой мощности.

При нагрузке трансформатора происходит непрерывная передача энергии из первичной цепи во вторичную. Согласно закону сохранения и превращения энергии, мощность тока во вторичной цепи равна мощности в первичной цепи; следовательно, должно было бы иметь место равенство:

$$I_1 U_1 = I_2 U_2.$$

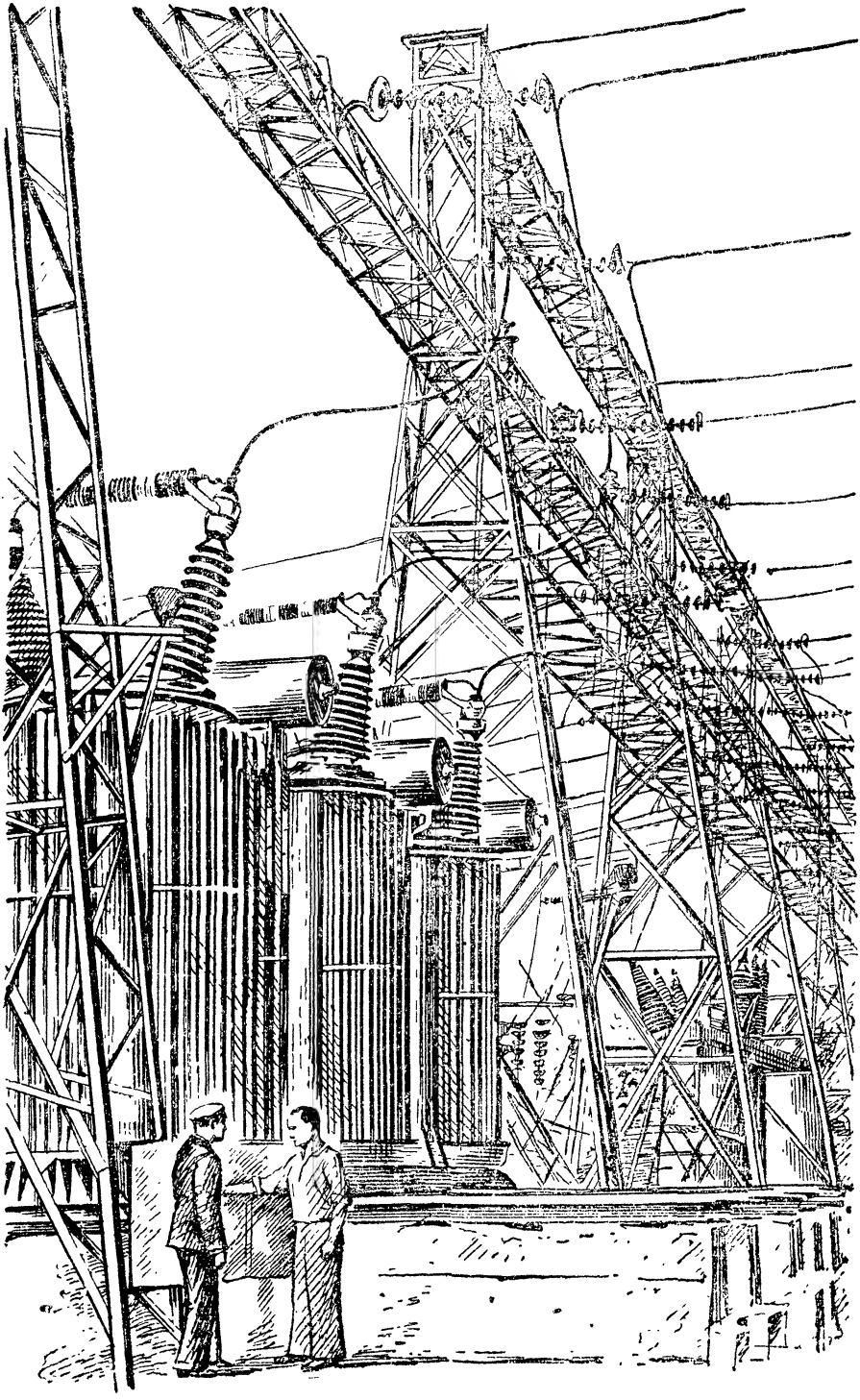


Рис. 211. Трансформаторная подстанция Днепровской гидроэлектростанции.

В действительности это равенство не соблюдается, так как при работе трансформатора имеются потери на нагревание обмоток трансформатора, на вихревые токи в сердечнике и на перемагничивание сердечника; однако потери эти невелики.

Трансформатор принадлежит к числу наиболее совершенных преобразователей энергии. Коэффициент полезного действия современных мощных трансформаторов достигает значений 94—99%. На рисунке 210 изображён трансформатор на небольшую мощность. На рисунке 211 показана трансформаторная подстанция Днепровской гидроэлектростанции.

В линиях трёхфазного тока используются или обычные однофазные трансформаторы, включаемые в каждую из трёх фаз линии, или же специальные трёхфазные трансформаторы, имеющие три пары обмоток.

Идея трансформатора впервые родилась в России и принадлежит изобретателю «русского света» П. Н. Яблочкову. Разрабатывая эту идею дальше, ассистент Московского университета И. Ф. Усагин сконструировал первый трансформатор, который он демонстрировал в 1882 г. на промышленной выставке в Москве.

108. Электрификация СССР. Громадное значение электрификации СССР придавал создатель Советского государства В. И. Ленин. В речи на III съезде комсомола он говорил:

«Мы знаем, что коммунистического общества нельзя построить, если не возродить промышленности и земледелия, причем надо возродить их не по-старому. Надо возродить их на современной, по последнему слову науки построенной, основе. Вы знаете, что этой основой является электричество, что только, когда произойдёт электрификация всей страны, всех отраслей промышленности и земледелия, когда вы эту задачу освоите, только тогда вы для себя сможете построить то коммунистическое общество, которое не сможет построить старое поколение».

В феврале 1920 г. по инициативе Ленина была создана Государственная комиссия по электрификации России (сокращённо: ГОЭЛРО).

По плану ГОЭЛРО намечалось за 10—15 лет построить 30 районных электростанций общей мощностью в 1,75 млн. киловатт. При жизни Ленина были построены две первые мощные электростанции: Шатурская тепловая электростанция (в 130 *км* от Москвы) мощностью свыше 100 000 *квт* и Волховская гидроэлектростанция мощностью 80 000 *квт*.

Но уже в 1932 г. мощность районных электростанций составляла 2,9 млн. *квт*.

За годы второй пятилетки мощность электростанций выросла до 8,1 млн. *квт*.

В 1946 г. СССР располагал электростанциями общей мощностью 10,7 млн. *квт*. За пятилетие с 1946 по 1950 г. по государственному плану восстановления и развития народного хозяй-

ства СССР мощность действующих в СССР электростанций должна была увеличиться на 11,7 млн. *квт*. План этот перевыполнен.

Ещё более грандиозным будет рост электроэнергетической базы СССР в результате осуществления строительства гидроэлектростанций на Волге, Каме, Днепре, Ангаре, Иртыше и других больших реках нашей Родины, а также многих тепловых электростанций.

Сооружение крупнейших в мире Волжской имени В. И. Ленина (мощностью 2 млн. 300 тыс. *квт*), Волжской имени XXII съезда КПСС (мощностью 2 млн. 530 тыс. *квт*) и Брат-

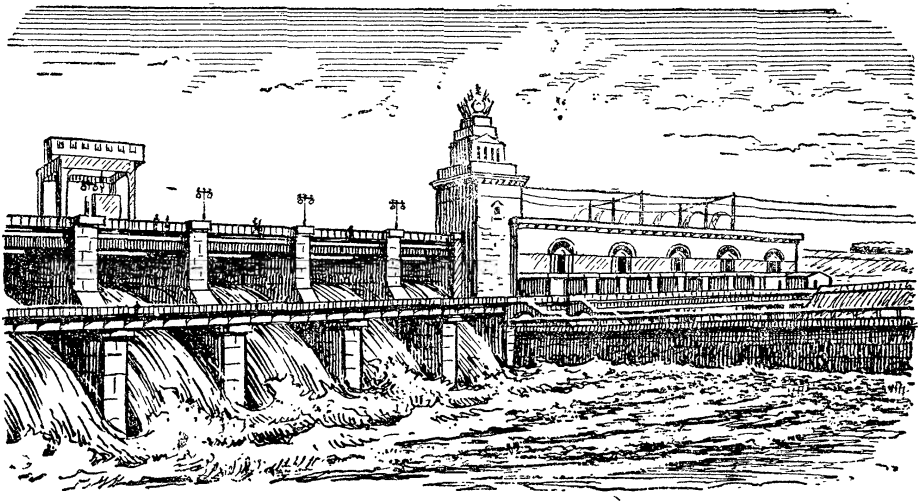


Рис. 212а. Внешний вид Цимлянской гидроэлектростанции.

ской (на 3 500 000 *квт*) гидроэлектростанций играет огромную роль в деле снабжения промышленных предприятий и сельского хозяйства электроэнергией, позволяет в ещё большей степени электрифицировать железные дороги.

Создание судоходного Волго-Донского канала имени В. И. Ленина позволило объединить все моря Европейской части Союза в единую водную систему. Сооружение гидростанции при плотине Цимлянского гидроузла мощностью 160 тыс. *квт* обеспечило дешёвую электроэнергию для промышленности и земледелия орошаемых полупустынных и засушливых земель Ростовской и Волгоградской областей. Энергию наших рек мы заставляем служить развитию промышленности и сельского хозяйства, увеличению их продуктивности, облегчению труда советских людей, улучшению материального благосостояния народа, строящего коммунизм.

Большую роль в деле электрификации имеет также строительство теплоэлектроцентралей и ветроэлектростанций.

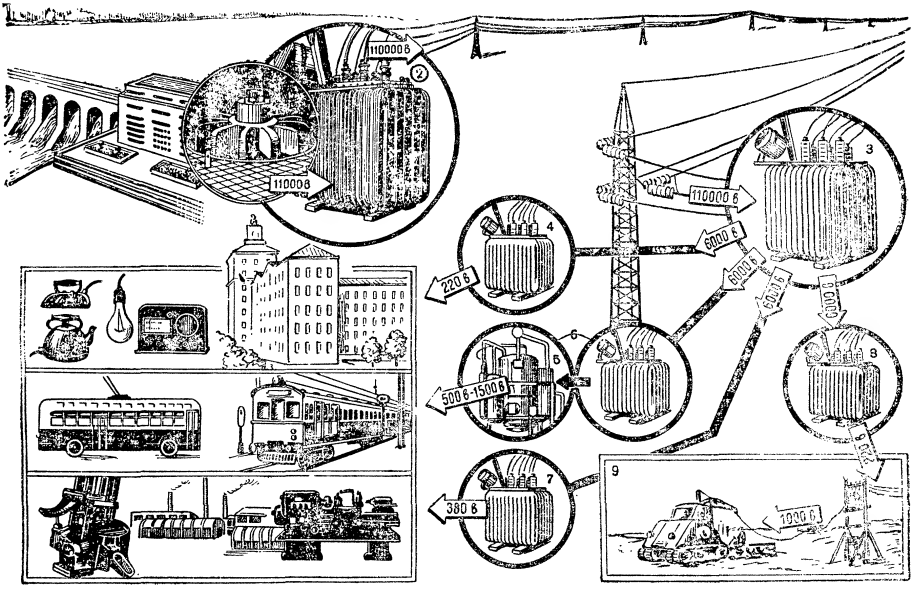


Рис. 212б. Схема передачи и распределения электроэнергии от электростанции к потребителям.

1. Генератор 11 000 *в*. *2*. Трансформатор, повышающий напряжение до 110 000 *в*. *3*. Трансформатор, понижающий напряжение до 6000 *в*. *4*. Трансформатор, понижающий напряжение до 220 *в*. *5*. Ртутный выпрямитель. *6*. Тяговая преобразовательная подстанция. *7*. Трансформатор для питания механизмов на предприятиях. *8—9*. Линия передачи энергии к тракторам.

В некоторых районах нашей страны нет крупных рек для строительства гидроэлектростанций, но имеются большие запасы горючих ископаемых: торфа, горючих сланцев, каменного угля. В этих районах строятся теплоэлектроцентрали; в них энергия, полученная при сжигании топлива, превращается в электрическую энергию, которая затем передаётся по проводам к потребителям.

Кроме того, важным источником электрической энергии служит ветер — «голубой уголь». В ветроэлектростанциях энергия движущегося воздуха превращается в электрическую энергию. Эти станции особенно выгодно строить в тех районах, где постоянно дуют ветры.

В связи со строительством гигантских электростанций наши учёные разрабатывают проблемы передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния с наименьшими потерями. Самой важной из этих проблем является изыскание возможностей максимального повышения напряжения в линиях передачи. В настоящее время построены линии электропередач от крупнейших гидроэлектростанций — Волжских имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС — на напряжение в 400 000 *в*.

Для передачи энергии от мощных сибирских электростанций будут использовать ещё более высокие напряжения (800 *кв*).

В настоящее время в Советском Союзе ведутся экспериментальные работы по передаче электрической энергии постоянным током. Удачное решение этой проблемы позволит ещё выше поднять к. п. д. линий передачи. Объясняется это тем, что одна и та же линия передачи оказывает меньшее сопротивление постоянному току, чем переменному, при одной и той же величине тока. Но генераторы постоянного тока не могут быть построены на необходимые для линий передач высокие напряжения. Поэтому напряжение от генераторов переменного тока необходимо сначала повысить до требуемого значения с помощью трансформаторов, а затем преобразовать в специальных высоковольтных выпрямителях в постоянное напряжение, которое и передавать в линию электропередачи. В пункте потребления постоянное напряжение надо преобразовать в переменное (в инвертерах), затем понизить до нужного значения с помощью трансформаторов.

ГЛАВА V

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

109. Изобретение радио А. С. Поповым. 25 апреля (по новому стилю 7 мая) 1895 г. Александр Степанович Попов доложил Русскому физико-химическому обществу об изобретённом им приборе, могущем улавливать и регистрировать грозовые разряды, происходящие на расстоянии до 30 *км*. Доклад свой А. С. Попов закончил следующими словами:

Попов Александр Степанович (1859—1906) — замечательный русский физик. Ему человечество обязано изобретением радио.

«В заключение могу выразить надежду, что мой прибор при дальнейшем усовершенствовании его может быть применён к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией».

Эту задачу ему самому и удалось решить. Почти через год, 24 марта 1896 г., А. С. Попов снова выступил в Русском физико-химическом обществе и на этот раз наглядно продемонстрировал возможность телеграфирования без проводов, публично передав первую в мире радиограмму, состоящую из двух слов: «Генрих Герц». В своей радиограмме Попов отметил имя учёного, впервые получившего в конце 1887 г. на опыте электромагнитные волны, существование которых было теоретически предсказано Максвеллом в 1865 г.

7 мая 1895 г. прочно вошло в историю мировой культуры как дата одного из величайших изобретений — радио, широко проникшего в народное хозяйство, быт людей и в военное дело.

Радио (радиотехника) в настоящее время является обширной и разносторонней отраслью техники, охватывающей передачу

на расстояние сигналов, речи, музыки, изображений предметов, вождение самолётов и кораблей, измерение расстояний между удалёнными пунктами земной поверхности, определение местоположений невидимых предметов и т. д.

Блестящий расцвет радиотехники, который сейчас мы наблюдаем, стал возможным в значительной степени благодаря успехам физики. В свою очередь радиотехника вооружила физику чрезвычайно гибкими и мощными средствами исследования и многими новыми идеями.

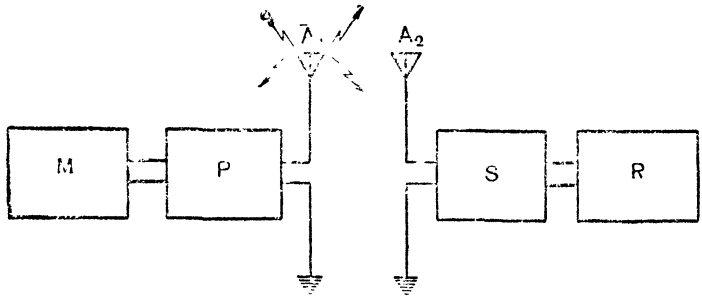


Рис. 213. Принципиальная схема односторонней радиосвязи.

Для радиопередачи и радиоприёма нужно осуществить следующие основные операции.

1. Создать высокочастотные электромагнитные колебания.
2. С помощью этих колебаний послать в пространство сигнал (речь, музыку, изображение).
3. Произвести приём сигнала.

Принципиальная схема односторонней радиосвязи изображена на рисунке 213. На этом рисунке передающая станция состоит из управляющего устройства M, передатчика P и антенны A_1. Приёмная радиостанция состоит из антенны A_2, приёмника S и воспроизводящего устройства R.

Для понимания устройства и принципа действия передающей и приёмной радиостанций необходимо прежде всего ознакомиться с физическими процессами, лежащими в основе радиопередачи и радиоприёма.

110. Колебательный контур. Электромагнитные колебания. Основным элементом радиотехнических устройств является колебательный контур. Колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из конденсатора C и катушки индуктивности L (рис. 214а).

Повернув переключатель P на контакт a (рис. 214б), можно зарядить конденсатор, т. е. сообщить ему некоторую электрическую энергию.

Если теперь отключить конденсатор от батареи, то на его обкладках останется некоторый электрический заряд: положительный на одной обкладке и отрицательный на другой.

При повороте переключателя в положение *b* электроны начнут перетекать с пластины, где они были в избытке, к пластине, где их недостаток; в цепи контура появится электрический ток, наличие которого регистрирует вспыхнувшая лампочка *К*, включённая в цепь контура.

Электрический ток, протекая по катушке индуктивности, создаёт магнитное поле внутри и вокруг катушки. Таким образом, при разряде конденсатора происходит переход энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки аналогично тому, как происходит переход потенциальной энергии отклонённого маятника в кинетическую энергию при его движении к положению равновесия. Мы знаем, что маятник, достигнув своего положения равновесия, не остановится, а будет продолжать движение дальше по инерции. В процессе этого движения происходит переход приобретённой им кинетической энергии в потенциальную. Нечто аналогичное имеет место и в случае электромагнитных колебаний в контуре.

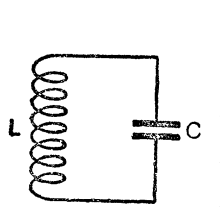


Рис. 214а. Колебательный контур.

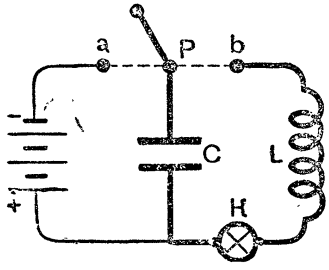


Рис. 214б. Простейшая схема для получения электромагнитных колебаний.

Чтобы разобраться более подробно в процессах, которые будут протекать в колебательном контуре после того, как конденсатор разрядился и вся энергия электрического поля перешла в энергию

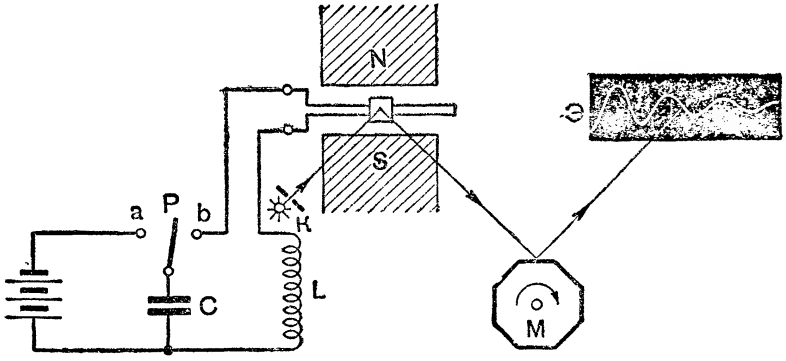


Рис. 215. Схема установки для изучения электромагнитных колебаний в контуре.

магнитного поля, обратимся к опыту. Воспользуемся осциллографом [1] и соберём установку, изображённую на рисунке 215, с по-

[1] Осциллограф — прибор для изучения различного рода быстропеременных электромагнитных процессов (§ 84).

мощь которой получим график, изображающий процесс изменения тока в колебательном контуре в зависимости от времени.

Полученный на экране *Э* график изменения тока в цепи даёт картину происходящего в колебательном контуре процесса. Из графика видно, что разрядный ток не мгновенно достигает своего максимального значения, а нарастает постепенно, так же как постепенно разряжается сам конденсатор. Причиной этого явления служит возникновение в цепи э. д. с. самоиндукции, которая препятствует любому изменению электрического тока в этой цепи.

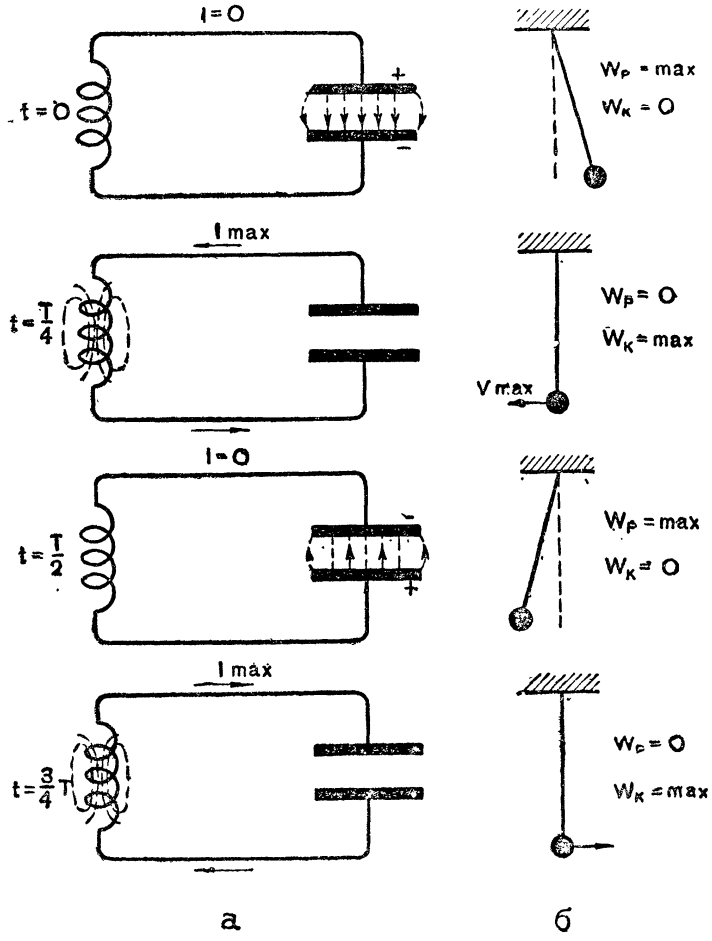


Рис. 216. Схема, иллюстрирующая процессы превращения энергии в колебательном контуре. Для сравнения рядом дана схема превращения кинетической и потенциальной энергии при колебаниях маятника.

После того как ток в катушке достигнет наибольшего значения и напряжение на обкладках конденсатора упадёт до нуля, ток, продолжая течь, начнёт перезаряжать конденсатор. Возникшее при этом электрическое поле, будучи направлено теперь против

тока, начнёт уменьшать величину его. Уменьшение же тока в контуре вызовет появление в катушке индуктивности э. д. с. самоиндукции.

Поддерживаемый э. д. с. самоиндукции ток в катушке, постепенно ослабевая, будет продолжать течь до тех пор, пока не закончится перезарядка конденсатора.

Когда же перезарядка конденсатора закончится, ток станет равен нулю, а напряжение на конденсаторе достигнет максимума.

С окончанием процесса перезарядки конденсатора энергия магнитного поля катушки окажется превращённой в энергию электрического поля, существующего между пластинами конденсатора, причём направление напряжённости этого поля будет противоположно начальному. Дальше конденсатор, вновь разряжаясь, создаёт ток противоположного направления. Энергия электрического поля постепенно начнёт убывать, превращаясь в энергию магнитного поля, которая в свою очередь опять перейдёт при повторной перезарядке конденсатора в энергию электрического поля, и т. д.

Таким образом, в цепи, состоящей из конденсатора и катушки индуктивности, будет переменный ток. Напряжение и ток в катушке периодически изменяются по величине и направлению. Периодически изменяются напряжённости электрического поля в конденсаторе и магнитного поля в катушке.

Периодические изменения напряжённости магнитного поля и напряжённости электрического поля называются электромагнитными колебаниями.

На рисунке 216, *а* изображены процессы превращения энергии в колебательном контуре, а на рисунке 216, *б* показаны аналогичные явления с превращением энергии при колебании маятника.

111. Собственные электромагнитные колебания. Период и частота. Рассмотренные нами в предыдущем параграфе электромагнитные колебания, возникающие в контуре, которому сообщён некоторый запас энергии, называются собственными электромагнитными колебаниями.

Чем бóльшая энергия была сообщена контуру, тем с большей амплитудой будут происходить колебания в контуре.

Периодом электромагнитных колебаний называется промежуток времени, в течение которого напряжение на обкладках конденсатора или ток в колебательном контуре совершает одно полное колебание. Период колебания измеряется секундами.

Для получения контура с заданной частотой колебания применяются конденсаторы различной ёмкости и катушки различной индуктивности. А для того чтобы можно было изменять частоту собственных колебаний контура, применяются конденсаторы с переменной ёмкостью (§ 24) и катушки с переменной индуктивностью. На рисунке 217 изображены катушки, обладающие различной индуктивностью, применяемые в радиотехнике.

Чем больше ёмкость конденсатора, тем в течение большего времени он будет разряжаться, с другой стороны, чем больше ин-

дуктивность, тем медленнее будет происходить нарастание тока в цепи и медленнее будет разряжаться конденсатор.

Зависимость периода собственных колебаний T от величины ёмкости и индуктивности колебательного контура определяется формулой Томсона (Кельвина):

$$T=2\pi\sqrt{LC},$$

где L — индуктивность в генри, C — ёмкость в фарадах, а T — период в секундах.

Величина, обратная периоду колебаний, называется частотой (f) колебаний $f=\frac{1}{T}$. Частота колебаний измеряется в герцах (*гц*). 1 *гц* — одно колебание в секунду.

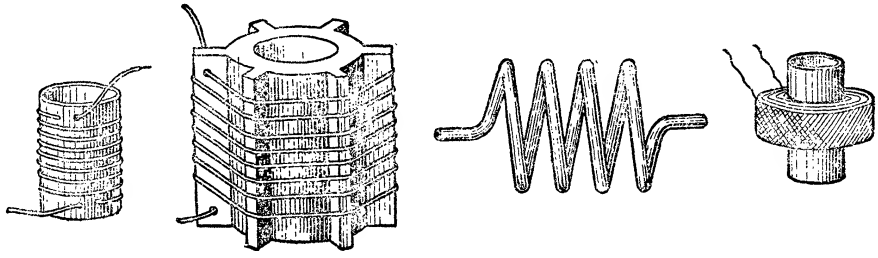


Рис. 217. Типы катушек с различной индуктивностью, применяемые в радиотехнике.

Так как в радиотехнике приходится иметь дело с очень большими частотами колебаний, то на практике часто применяются единицы, в 1000 раз большие,— килогерц (*кгц*) и, в 10^6 раз большие,— мегагерц (*Мгц*).

112. Затухающие электромагнитные колебания. На графике тока, текущего в колебательном контуре (рис. 218), видно, что амплитуда тока непрерывно уменьшается. Этот факт указывает на то, что в колебательном контуре не вся энергия электрического поля превращается в энергию магнитного поля, часть её непрерывно расходуется на преодоление сопротивлений в контуре. Если контур не пополнять энергией, то колебательный процесс в нём практически очень быстро прекратится, подобно тому как прекращается колебательный процесс маятника, который также непрерывно расходует сооб-

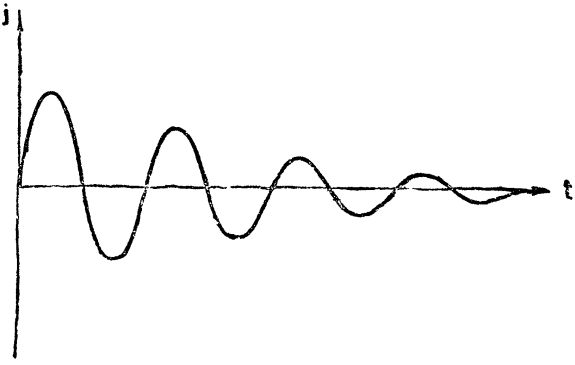


Рис. 218. График изменения тока в колебательном контуре.

щённую ему однажды энергию на преодоление различных видов сопротивлений. Как механические, так и электрические колебания подобного вида называются затухающими колебаниями. Чтобы процесс затухания колебаний проходил медленнее, необходимо уменьшить величину сопротивления контура, что уменьшит количество энергии, идущей на нагревание проводников контура. Но невозможно создать колебательный контур, в котором свободные колебания продолжались бы как угодно долго, так как сопротивление элементов контура нельзя сделать равным нулю. Поэтому *свободные колебания в колебательном контуре всегда будут затухающими колебаниями.*

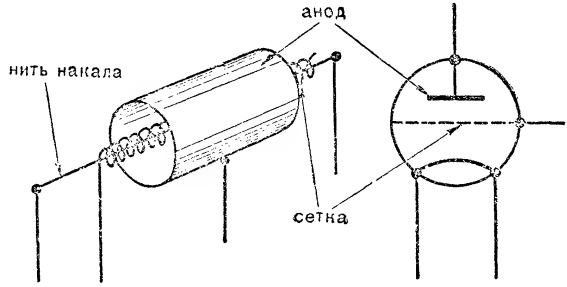


Рис. 219. Трёхэлектродная лампа и её устройство.

113. Трёхэлектродная электронная лампа. В современной радиотехнике используются главным образом незатухающие электромагнитные колебания, получаемые при помощи трёхэлектродной электронной лампы. Устройство и схематическое изображение такой лампы показано на рисунке 219.

В этой лампе нить накала, нагреваемая специальной батареей накала, окружена металлической спиралью, помещённой внутри металлического цилиндра. В баллоне, в котором помещены все

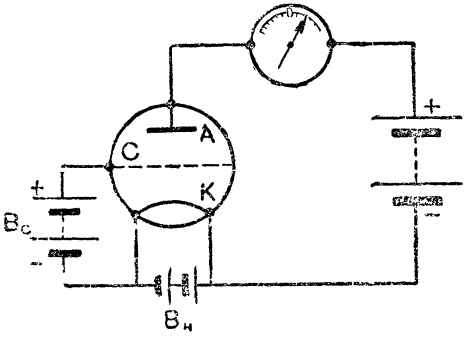


Рис. 220. Усиление или ослабление анодного тока с помощью сетки.

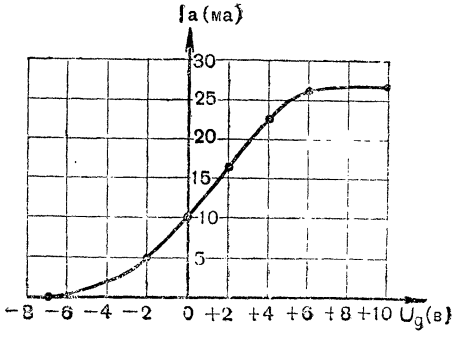


Рис. 221. Сеточная характеристика лампы.

три электрода лампы, создаётся высокий вакуум. Спираль, окружающая нить, называется сеткой, металлический же цилиндр — анодом, нить накала, как и в двухэлектродной лампе, служит катодом. Два конца нити накала, конец сетки и анода выведены через баллон наружу лампы и включаются в цепь при помощи четырёх ножек.

Какую роль играет сетка в электронной лампе?

Создавая то или иное напряжение между сеткой и нитью, при помощи вспомогательной батареи B_c (рис. 220) можно усиливать или ослаблять анодный ток, не меняя анодного напряжения. Действительно, если потенциал сетки выше потенциала нити, то сетка притягивает электроны из электронного облачка около нити. Эти электроны проскакивают между витками сетки и достигают анода. Если же потенциал сетки ниже потенциала нити, то она отталкивает электроны, вследствие чего электронный поток к аноду ослабляется или даже совсем прекращается. В последнем случае принято говорить, что лампа «заперта».

На рисунке 221 показан график сеточной характеристики лампы. По горизонтальной оси откладывается напряжение между сеткой и катодом (U_g), а по вертикальной оси — ток в анодной цепи (I_a).

Благодаря близости сетки к нити влияние сетки на интенсивность электронного потока очень велико. Небольшие колебания напряжения между сеткой и нитью вызывают весьма большие колебания электронного потока, т. е. тока в анодной цепи. Это ценнейшее свойство трёхэлектродной электронной лампы делает её незаменимой в радиотехнике, где часто требуется усиливать весьма слабые электрические колебания.

114. Получение незатухающих электромагнитных колебаний. Для получения незатухающих высокочастотных колебаний, применяемых в радиосвязи, используется ламповый генератор. Задачей лампового генератора является преобразование энергии постоянного тока, даваемого источниками тока, в энергию переменного тока высокой частоты, возникающего в колебательном контуре.

Простейшая схема такого генератора представлена на рисунке 222. Она состоит из колебательного контура, электронной лампы и источников питания.

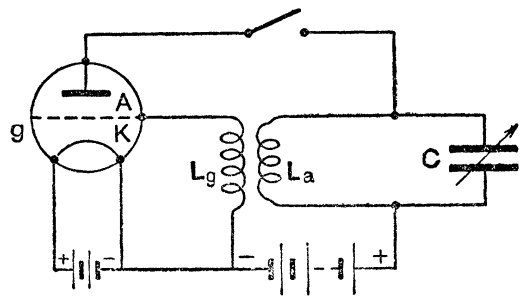


Рис. 222. Простейшая схема генератора незатухающих электромагнитных колебаний.

Если при разогретом катоде K электронной лампы ключом замкнуть анодную цепь, то по ней пойдёт ток, который зарядит конденсатор C контура. Последний будет разряжаться на катушку L_a, и в контуре возникнут колебания, частота которых определится величинами ёмкости и индуктивности контура.

Переменный ток, проходящий через катушку L_a, индуктирует в сеточной катушке L_g переменную э. д. с., частота которой равна частоте колебаний в контуре.

Так как концы катушки L_g присоединены один к сетке, а другой к нити накала лампы K, то в ламповом промежутке сетка — катод возникает той же частоты переменное электрическое поле,

а между сеткой и катодом — переменное напряжение. Это переменное напряжение управляет анодным током в цепи лампы, то увеличивая, то уменьшая его, в такт с колебаниями в контуре.

Рассмотрим несколько подробнее этот процесс.

В течение полупериода потенциал сетки положителен — лампа «открыта»; через неё проходит анодный ток. В течение первой половины этого полупериода, когда на верхней обкладке конденсатора C накапливается отрицательный заряд, анодный ток будет подзаряжать конденсатор, пополняя его заряд. При разряде конденсатора, происходящем в течение второй половины этого же полупериода, анодный ток увеличивает силу разрядного тока, текущего через катушку $L_а$.

В течение второго полупериода потенциал сетки отрицателен — лампа «запирается», и анодный ток в ней прекращается. Описанный процесс повторяется в каждый период.

Таким образом, в генераторе лампа в течение каждого периода автоматически в нужные моменты времени включает батарею в колебательный контур, обеспечивая пополнение энергии в нём, и этим поддерживает в контуре незатухающие колебания.

Графически незатухающие колебания изобразятся периодически изменяющейся кривой с постоянной амплитудой.

Хорошей аналогией энергетических процессов, происходящих в ламповом генераторе незатухающих колебаний, являются процессы превращения энергии в маятниковых часах. Незатухающие колебания маятника поддерживаются за счёт энергии пружины или поднятой гири, а роль лампы выполняет храповый механизм, дважды за период обеспечивающий пополнение энергией качающийся маятник.

115. Вынужденные колебания. Резонанс. Представим себе, что мы раскачиваем маятник, действуя на него периодически изменяющейся силой. В этом случае маятник будет совершать колебания не самостоятельно, не свободно, а под действием периодической внешней силы. Такие колебания маятника называются вынужденными колебаниями (см. ч. II).

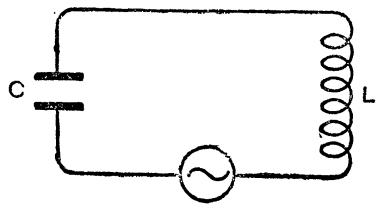


Рис. 223. Колебательный контур с приключённым к нему генератором переменного тока.

Вынужденные колебания маятника будут происходить с частотой, которая определяется только частотой изменения внешней силы.

Вынужденные колебания могут поддерживаться внешней силой так, что амплитуда колебаний маятника будет постоянной, т. е. можно получить вынужденные незатухающие колебания. Убыль энергии маятника в таких колебаниях непрерывно пополняется за счёт работы внешней силы, действующей на маятник.

В электрических колебательных контурах также могут происходить вынужденные электромагнитные колебания.

Если в каком-либо колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивностью L и конденсатора ёмкостью C (рис. 223), всё время действует генератор переменного тока, то э. д. с. генератора будет вызывать в этом контуре переменный электрический ток с частотой колебаний э. д. с. генератора. Частота этих вынужденных колебаний в общем случае не совпадает с частотой собственных колебаний контура, определяемых по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Если эта внешняя переменная э. д. с. имеет постоянную амплитуду, то и вынужденные колебания в контуре будут происходить с постоянной амплитудой, т. е. будут незатухающими.

Таким образом, в колебательном контуре могут существовать два типа колебаний: 1) собственные колебания, частота которых определяется свойствами самого контура, его индуктивностью и ёмкостью, и 2) вынужденные колебания, частота которых определяется действующей в контуре э. д. с. и может быть различной.

Когда собственная частота колебательного контура далека от частоты э. д. с., действующей в контуре, общее сопротивление контура велико и ток в нём незначителен.

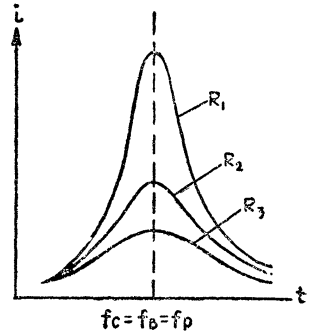


Рис. 224. Кривые резонанса.

При сближении частоты собственных колебаний контура и частоты э. д. с., действующей в контуре, наблюдается увеличение тока в контуре, и, когда наступает совпадение частот, сопротивление контура становится наименьшим, равным активному, а ток становится наибольшим.

Такой случай является особенно важным, он называется *резонансом.*

Итак, условием возникновения резонанса в колебательном контуре является равенство частоты внешнего подаваемого на контур напряжения частоте собственных колебаний контура.

На рисунке 224 показан примерный вид кривых резонанса. На горизонтальной оси отложена переменная собственная частота контура f_c (частота $f_в$ внешнего приложенного напряжения обычно бывает постоянной), по вертикальной оси отложены значения тока в контуре. При резонансе ($f_c = f_в = f_р$) ток в контуре (т. е. амплитуда вынужденных колебаний) получается наибольшим, ток в этом случае будет зависеть только от приложенного к контуру напря-

жения и активного сопротивления цепи. При отклонении частоты в любую сторону от резонансной ток в контуре уменьшается.

Чем меньше сопротивление контура, т. е. чем меньше затухание, тем сильнее ток в контуре и круче кривая резонанса. Такой случай принято называть о с т р ы м р е з о н а н с о м.

Контур, обладающий острым резонансом, очень чувствителен к колебаниям резонансной частоты. Наоборот, при большом затухании колебаний в контуре (большое сопротивление контура) ток при резонансе небольшой, резонансная кривая пологая и резонанс получается тупой. На рисунке 224 показаны три резонансные кривые для сопротивлений $R_1 < R_2 < R_3$.

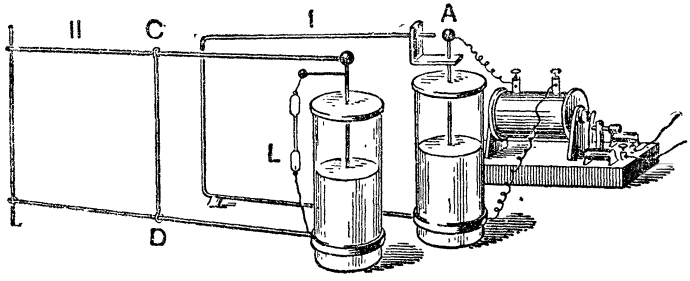


Рис. 225. Простейшая установка для наблюдения резонанса.

Явление резонанса широко применяется в радиотехнике. С этим явлением, например, мы встречаемся при настройке радиоприёмника на какую-нибудь передающую радиостанцию. Поворачивая ручку настройки, мы тем самым изменяем ёмкость конденсатора, а стало быть, и частоту собственных колебаний контура приёмника. Когда частота собственных колебаний в соответствующих контурах радиоприёмника совпадает с частотой, на которой работает передающая радиостанция, наступает резонанс: ток в контурах радиоприёмника достигает максимума, и громкость приёма данной радиостанции получается наибольшей. В этом и состоит сущность настройки приёмника на передающую станцию.

Явление резонанса двух контуров можно пронаблюдать на опыте с помощью установки, изображённой на рисунке 225.

Первичный колебательный контур состоит из лейденской банки, прямоугольной проволочной петли и искрового разрядника. Этот контур будет обладать определённой ёмкостью и индуктивностью. При подведении к разряднику A напряжения лейденская банка разряжается, и при некотором напряжении на её обкладках в разряднике проскакивает искра. Искра, представляющая собой токопроводящий мостик, замыкает контур; при этом в контуре возникают затухающие колебания. В момент, когда искра гаснет, колебания прекращаются и происходит новая зарядка банки от источника напряжения. Колебательный процесс в контуре для данного случая можно представить в виде отдельных следующих друг за другом серий затухающих колебаний с собственной частотой контура.

Второй контур имеет также лейденскую банку с ёмкостью, равной или близкой к ёмкости банки первого контура, и проволочной петлёй таких же размеров, но с перемещающейся перекладиной CD для изменения индуктивности контура. Меняя местоположение перекладины, добиваются того, чтобы

газосветная лампочка L, присоединённая к внутренней и наружной обкладкам банки, ярко вспыхнула. Свечение лампочки показывает, что напряжение на обкладках конденсатора достигло наибольшей величины. Это случится, когда второй контур окажется настроенным в резонанс на частоту первого контура.

С вынужденными электромагнитными колебаниями и явлением резонанса мы встречаемся не только в радиотехнике, но и в электротехнике. Так, переменный ток в любой цепи представляет собой вынужденные электромагнитные колебания в ней. Каждая данная цепь переменного тока, обладая индуктивностью и ёмкостью, обладает вместе с этим и собственной частотой колебания. Если собственная частота цепи окажется равной частоте э. д. с. генератора, питающего цепь, то ток в цепи достигнет максимума. В этом и заключается явление резонанса в цепи переменного тока.

Это явление можно наблюдать на установке, схема которой дана на рисунке 226. В этой установке цепь состоит из катушки индуктивности L (обмотка трансформатора) и конденсатора C.

Реостат с сопротивлением R введён для ограничения тока в цепи при резонансе; амперметр A регистрирует изменения тока в цепи. Катушка с индуктивностью L и конденсатор с ёмкостью C включены последовательно. Изменяя величину индуктивности или ёмкости цепи, добиваются наибольшего тока в цепи. Величина этого тока при резонансе определяется только включённым в цепь реостатом с сопротивлением R.

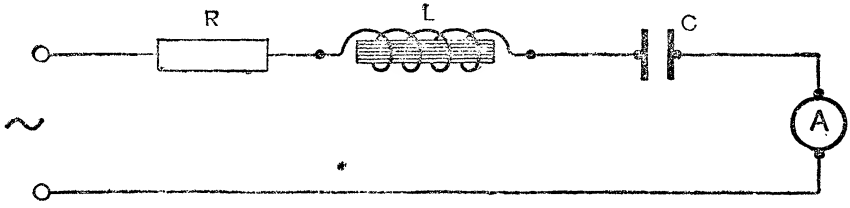


Рис. 226. Схема установки для наблюдения электрического резонанса.

116. Электромагнитное поле. В основе радиосвязи лежит учение об электромагнитном поле, развитое Максвеллом.

Чтобы понять сущность теории Максвелла, рассмотрим наиболее общий случай индукции. Представим себе проводник, концы которого присоединены к гальванометру (рис. 227). Допустим теперь, что площадь, ограниченную нашим проводником, пронизывают силовые линии магнитного поля H. При всяком изменении этого магнитного поля, согласно закону индукции, в проводнике будет возникать э. д. с. индукции, которая возбудит в нём ток.

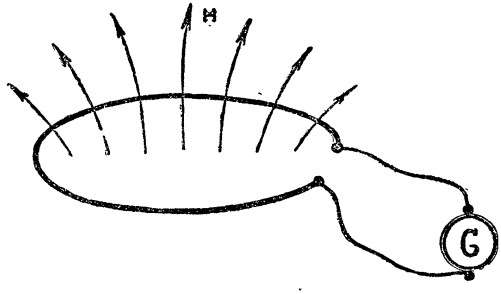


Рис. 227. Изменения магнитного поля вызывают появление электрического поля, которое может быть обнаружено с помощью проводника, замкнутого на гальванометр.

На первый взгляд представляется, что проводник в явлении электромагнитной индукции играет главную роль. Однако это не так. Максвелл установил, что проводник позволяет лишь обнаружить явление индукции. Истинная сущность этого явления заключается в том, что

в пространстве, где изменяется магнитное поле, возникает изменяющееся электрическое поле.

В отличие от поля неподвижных зарядов, силовые линии изменяющегося электрического поля замкнуты так же, как и силовые линии магнитного поля.

Максвелл теоретически обосновал, что между электрическими и магнитными полями существует теснейшая связь: ***всякое изменение магнитного поля вызывает появление в окружающем пространстве изменяющегося электрического поля.*** Аналогично, ***всякое изменение электрического поля вызывает появление в окружающем пространстве изменяющегося магнитного поля.***

Чем с большей скоростью $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ происходит изменение напряжённости электрического поля, тем более сильное возникает магнитное поле, связанное с электрическим полем. Точно так же при большей скорости $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ изменения напряжённости магнитного поля появляется более сильное электрическое поле, связанное с магнитным полем.

Совокупность переменного электрического поля и неразрывно связанного с ним переменного магнитного поля называется электромагнитным полем.

Важнейшая особенность электромагнитного поля заключается в том, что оно распространяется в пространстве с громадной скоростью; именно это и обеспечивает возможность осуществления радиосвязи.

Максвелл Джемс Клерк (1831—1879) — гениальный английский учёный. Он создал теорию электромагнитного поля и на основании её заключил, что переменные электрические и магнитные поля тесно связаны друг с другом, образуя единое электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитных волн со скоростью света. Основываясь на связи электрических, магнитных и световых явлений, Максвелл разработал электромагнитную теорию света и тем объединил в одно целое ранее разрозненные области электричества, магнетизма и оптики.

Кроме этого, Максвеллу принадлежат крупные открытия в других областях физики, в частности в области молекулярно-кинетической теории газов.

117. Электромагнитные волны. Быстропеременное электромагнитное поле обладает тем замечательным свойством, что оно не остаётся вокруг проводов, а распространяется в окружающем пространстве.

Если в какой-либо точке пространства возникло быстро изменяющееся электрическое поле, то оно в соседних точках пространства возбуждает магнитное поле, которое (поскольку оно тоже изменяется) возбуждает электрическое поле, и т. д.

Изменяющиеся электрические и магнитные поля захватывают всё новые и новые области пространства, распространяясь в вакууме со скоростью около 300 000 *км/сек*, т. е. с такой же скоростью, с какой распространяется свет. В процессе распространения электромагнитного поля происходит перенос энергии, которой обладает это поле.

Процесс распространения периодически изменяющегося электромагнитного поля представляет собой волновой процесс — электромагнитные волны.

Источником электромагнитных волн могут быть не только специальные устройства—передатчики, но и любые искровые электрические разряды, например грозовые разряды.

Герц Генрих (1857—1894) — знаменитый немецкий физик. Он первый получил электромагнитные волны, существование которых было теоретически предсказано Максвеллом. Исследования свойств электромагнитных волн, проведённые Герцем, показали, что эти волны подчиняются тем же законам, что и световые. Этим открытием была подтверждена электромагнитная теория света.

Теория и опыт показывают, что векторы напряжённости электрического и магнитного поля в электромагнитной волне перпендикулярны друг к другу и к направлению распространения.

На рисунке 228 изображены графики изменения напряжённостей электрического (E) и магнитного (H) полей электромагнитной волны, распространяющейся в направлении OZ.

Расстояние, на которое перемещается волна за промежуток времени, равный одному периоду колебания, называется длиной волны (λ).

Следовательно,

$$\lambda = c \cdot T,$$

или

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

В этих формулах c — скорость распространения электромагнитных волн; T — период колебания и f — частота колебаний.

По существующим международным соглашениям различают следующие виды радиоволн.

Название волн	Частоты	Длины волн
Длинные волны	100 *кгц* и менее	3000 *м* и выше
Средние волны	100—1500 *кгц*	3000—200 *м*
Промежуточные волны	1500—6000 »	200—50 »
Короткие волны	6—30 *Мгц*	50—10 »
Ультракороткие волны:		
Метровые	30—300 *Мгц*	10—1 *м*
Дециметровые	300—3000 »	1—0,1 »
Сантиметровые	3000—30 000 »	0,1—0,01 »

В радиотехнической практике принято называть волны от 2000 до 750 *м* длинными, от 750 до 200 *м* средними, от 50 до 10 *м* короткими и короче 10 *м* ультракороткими.

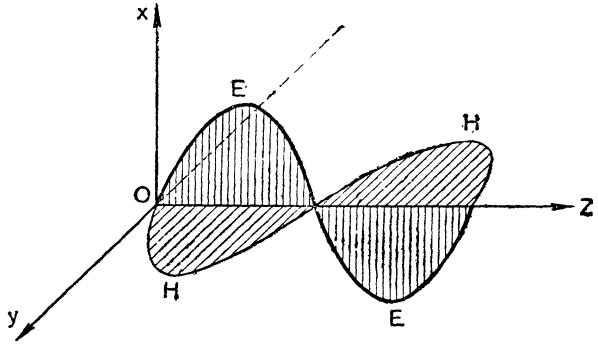


Рис. 228. Графики изменения напряжённости электрического и магнитного полей электромагнитной волны.

118. Излучение и приём электромагнитных волн. В колебательном контуре (рис. 229, *а, б*), состоящем из катушки и конденсатора, возникающее переменное магнитное поле сосредоточено главным образом в катушке, а электрическое поле — между обкладками конденсатора. Такой контур, называемый закрытым контуром, электромагнитные волны в пространство почти не излучает.

Излучение электромагнитных волн можно осуществить с помощью открытого колебательного контура, показанного на рисунке 229, *в*. На этом рисунке верхняя обкладка конденсатора заменена проводом, который располагается как можно выше над землёй. Нижний провод, заменяющий другую обкладку конденсатора, располагается у самой земли или просто заменяется землёй («заземляется»).

Вертикальный провод, соединяющий верхний и нижний горизонтальные проводы, в радиотехнике называется снижением.

Провод снижения принимает главное участие в излучении электромагнитных волн. Вся рассмотренная система проводов называется антенной.

Антенна была впервые изобретена А. С. Поповым. Им же впервые было применено при радиопередаче и радиоприёме заземление.

Изображённый на рисунке 229, *в* контур называется открытым колебательным контуром.

Катушка L, включённая в провод снижения, связывает его с катушкой индуктивности L_a высокочастотного генератора. Это даёт возможность поддерживать в открытом колебательном контуре непрерывные электромагнитные колебания. Для получения наибольшей амплитуды этих колебаний антенна должна быть настроена в резонанс с генератором электромагнитных колебаний.

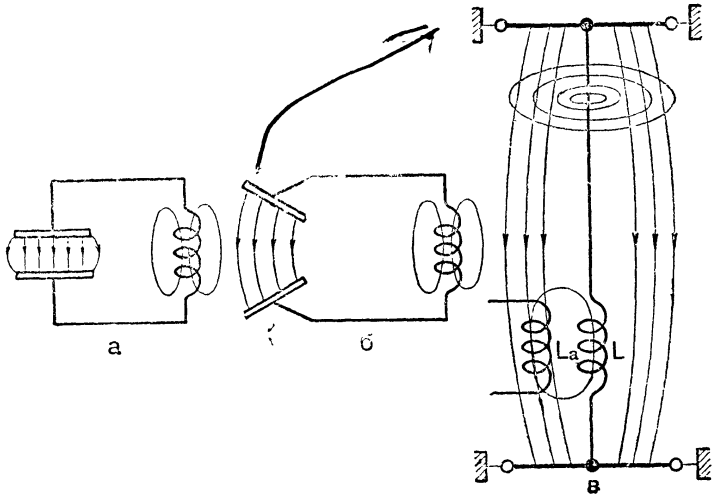


Рис. 229. Переход от закрытого колебательного контура (*а*, *б*) к открытому (*в*).

Электромагнитные волны, излучённые антенной, распространяются во все стороны от антенны. Если на своём пути электромагнитные волны встречают проводники, они возбуждают в них быстропеременные токи той же частоты, какова частота создавшего их электромагнитного поля.

При этом часть энергии, которую несут с собой электромагнитные волны, превращается в энергию индукционных токов высокой частоты, возникающих в проводниках.

Проводники, в которых электромагнитные волны возбуждают переменные токи высокой частоты, называются приёмными антеннами.

119. Передатчик и приёмник А. С. Попова. Максвелл теоретически, а Герц на опыте доказали существование электромагнитных волн. Великая заслуга А. С. Попова заключается в получе-

нии и применении электромагнитных волн для практических целей — телеграфирования без проводов.

В своих первых опытах по радиосвязи в качестве радиопередатчика Попов использовал простейший вибратор Герца, колебания в котором возбуждались искровым разрядом. Вибратор Герца состоит из двух проводников одинаковой длины, разделённых небольшим промежутком. К проводникам присоединяется источ-

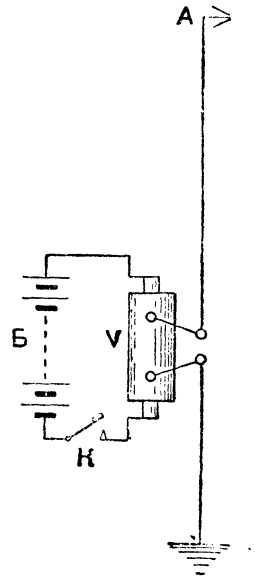


Рис. 230. Передатчик А. С. Попова.

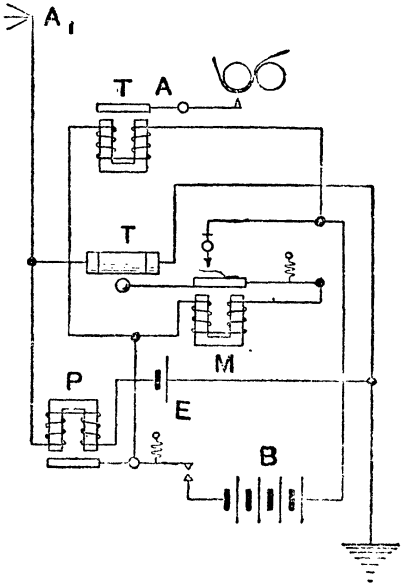


Рис. 231. Приёмник А. С. Попова.

ник высокого переменного напряжения. Когда напряжение между проводниками достигает величины, при которой через разрядник проскакивают искры, в вибраторе возникают колебания. При этом в окружающее пространство излучаются электромагнитные волны.

Вибратор Герца Попов заменил заземлённой антенной.

Схема такого передатчика изображена на рисунке 230. Здесь V — источник высокого переменного напряжения, питаемый батареей $Б$. При нажатии ключа K в искровом промежутке образуется искра, представляющая собой колебательный процесс, вследствие чего антенна A начнёт излучать электромагнитные волны. Эти волны, достигая антенны A_1 приёмной станции (рис. 231), возбуждают электромагнитные колебания в цепи, содержащей эту заземлённую антенну и когерер T.

Существенной частью радиоприёмника Попова являлся чувствительный индикатор электромагнитных колебаний — когерер.

Когерер состоит из стеклянной трубочки, в которую вставлены два электрода, а между этими электродами помещены металлические опилки. Сопротивление металлических опилок резко

уменьшается, когда через опилки проходит ток высокой частоты. Если после этого встряхнуть трубочку или слегка ударить по ней, то сопротивление опилок вновь увеличивается.

Когда под действием возникших в цепи антенны высокочастотных колебаний сопротивление когерера уменьшается, то ток от элемента *E*, идущий через когерер и обмотку электромагнита *P*, усиливается. Вследствие этого якорь электромагнита притягивается и замыкает цепь мощной батареи *B*. Эта батарея питает параллельно соединённые телеграфный аппарат *TA* и электромагнит *M*. Назначение электромагнита *M* — приводить в колебание молоточек, который, ударяя по когереру, встряхивает его и прекращает ток в цепи батареи *B*. На ленте в телеграфном аппарате будет записана чёрточка или точка, в зависимости от того, на длинный или короткий промежуток времени ключ *K* на передающей станции (рисунок 230) замыкает цепь.

Нетрудно видеть, что электромагнит *P* с железным сердечником и контактом представляет собой не что иное, как электромагнитное реле, работающее при слабых токах.

Дальнейшим усовершенствованием Попова было введение настройки антенны на определённую частоту.

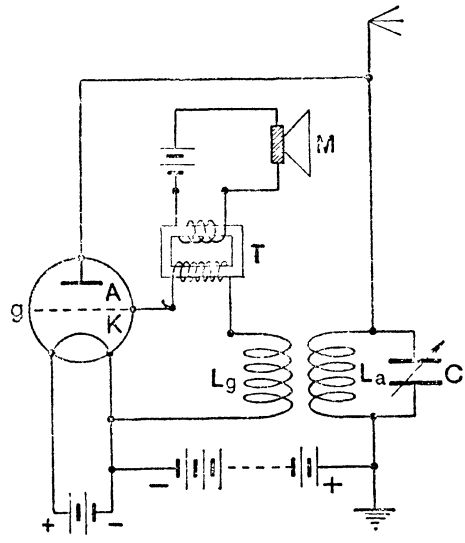


Рис. 232. Схема установки для получения модулированных электромагнитных колебаний.

В 1897 г. А. С. Попов поставил ряд опытов по передаче радиосигналов на судах Балтийского флота.

Зимой 1899 г. радио было использовано при проведении работ по спасению севшего на камни броненосца «Генерал-адмирал Апраксин». А. С. Попов со своими помощниками П. Н. Рыбкиным и Д. С. Троицким во время спасательных работ поддерживал связь между островом Гогланд, у которого броненосец сел на камни, и местечком Котке на побережье, на расстоянии около 50 *км* от острова. Тогда же радио было использовано для спасения рыбаков, угнанных на льдине в море. Это было первое практическое применение радио. В это время П. Н. Рыбкиным было сделано очень важное открытие — приём сигналов на слух, на телефонную трубку, которое позволило увеличить дальность радиосвязи.

Улучшая конструкцию передающих и приёмных аппаратов и усиливая мощность передатчиков, А. С. Попов довёл передачу радиосигналов до нескольких сот километров.

А. С. Попов был замечательным учёным и горячим патриотом своей родины. Американские капиталисты неоднократно предлагали ему продать своё изобретение и переехать в Америку. Но А. С. Попов решительным образом отвергал подобные предложения и в ответ писал:

«Я русский человек, и все свои знания, весь свой труд, все свои достижения имею право отдать только своей родине... И если не современники, то, может быть, потомки наши поймут, сколь велика моя преданность нашей родине и как счастлив я, что не за рубежом, а в России открыто новое средство связи».

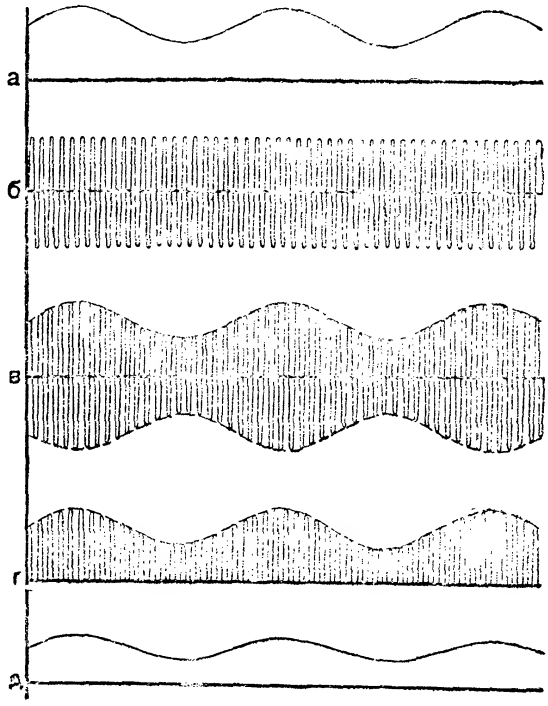


Рис. 233. Модулирование колебаний.

120. Модулированные колебания. Для передачи звуков по радио нужно воздействием звуковых колебаний вызвать соответствующие им изменения в излучаемых антенной электромагнитных волнах. Для этого в цепи микрофона возбуждают колебания электрического тока, которые в точности соответствуют звуковым колебаниям, действующим на микрофон (рис. 233, *а*). Колебания электрического тока в цепи микрофона индуктируют на концах вторичной обмотки трансформатора T, включённого в цепь микрофона, переменное напряжение.

Вторичная обмотка трансформатора включается в цепь сетки g лампового генератора высокой частоты (рис. 232). Таким образом, на сетку лампы подаётся переменное напряжение звуковой частоты. В результате этого амплитуда высокочастотных колебаний (рис. 233, *б*) в колебательном контуре генератора меняется в соответствии с изменениями напряжения на сетке лампы, происходящими со звуковой частотой (рис. 233, *в*).

Высокочастотные колебания, в которых происходят изменения амплитуды колебаний, соответствующие передаваемым звукам или каким-нибудь другим сигналам, называются м о д у л и р о-

ванными колебаниями, а самый процесс этих изменений — модуляцией.

121. Детектирование. Детекторный приёмник. Радиоприёмник состоит в основном из следующих элементов: 1) антенны, 2) колебательного контура, 3) детектирующего устройства и 4) телефонной трубки.

Так как в антенне радиотелефонного передатчика высокочастотные токи, протекающие в ней, являются модулированными, то и электромагнитные волны, излучаемые антенной, будут тоже модулированными. Такие же модулированные колебания возникают и в антеннах радиоприёмников.

Чтобы обеспечить получение звука в радиоприёмной установке, необходимо преобразовать высокочастотные модулированные колебания в колебания звуковой частоты, с помощью которых была осуществлена модуляция в радиотелефонном передатчике. Процесс преобразования модулированных колебаний в колебания звуковой частоты носит название детектирования.

Детектирование осуществляется путём использования полупроводников или специальных устройств, обладающих односторонней проводимостью, которые носят название детекторов.

В цепи, содержащей детектор, происходит выпрямление модулированных колебаний. Ток, текущий в цепи детектора, представляет собой пульсирующий ток переменной величины (рис. 233, *г*). Этот пульсирующий ток можно рассматривать как сочетание высокочастотных пульсаций и колебаний звуковой частоты (рис. 233, *д*). Для того чтобы полностью осуществить разделение высокочастотных пульсаций и тока звуковой частоты, достаточно в цепи детектора создать разветвление, причём такое, в котором одна из ветвей была бы легкопроходимой для высокочастотных токов, другая же представляла для таких токов большое сопротивление, а для токов звуковой частоты обладала бы незначительным сопротивлением.

Таким разветвлением являются, например, параллельно соединённые конденсатор и телефон. Через конденсатор будут проходить высокочастотные токи, через обмотки телефона в основном будет протекать ток звуковой частоты. В телефоне будут, таким образом, воспроизводиться звуковые колебания той же частоты (рис. 233, *д*), как и частота звуковых колебаний (рис. 233, *а*), с помощью которых осуществлялась модуляция высокочастотных колебаний в радиопередатчике.

Простейшими детекторами являются кристаллические детекторы, в которых контакт между кристаллом и металлом или между двумя кристаллами обладает односторонней проводимостью.

На рисунке 234 изображена наглядная схема детекторного радиоприёмника. На этой схеме показан приёмный колебательный контур, состоящий из контурной катушки индуктивности (2) и конденсатора переменной ёмкости (1). Приёмный контур включён в цепь антенны. С помощью конденсатора переменной ёмкости

производится настройка контура на частоту принимаемой радиостанции. К колебательному контуру приключена цепь детектора (3), содержащая в себе параллельно включённые конденсатор (5) и телефон (4). Модулированные высокочастотные колебания, возникающие в приёмном контуре, в цепи детектора выпрямляются, как об этом было сказано раньше, а в разветвлении телефон — конденсатор происходит разделение токов звуковой частоты, идущих через телефон, и высокочастотных пульсаций, проходящих через конденсатор. Мембрана телефона под действием токов звуковой частоты воспроизводит те звуковые колебания, которые поступают на микрофон передающей станции.

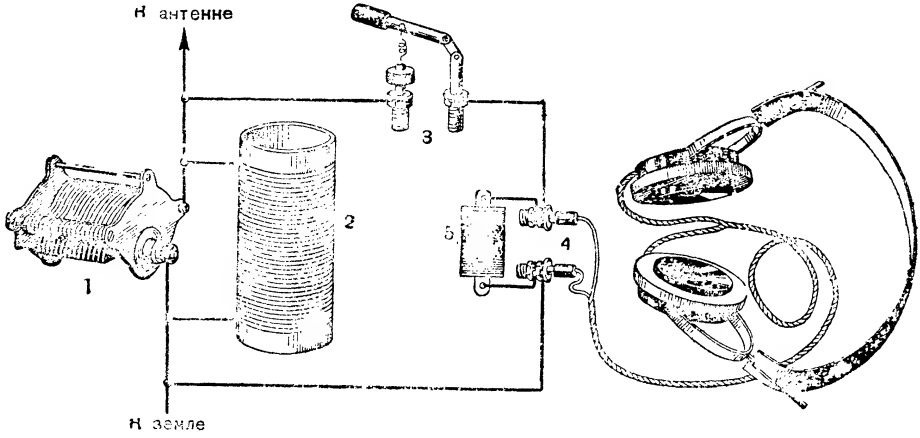


Рис. 234. Устройство простейшего детекторного радиоприёмника.

Таким образом, детекторные приёмники могут быть использованы там, где не имеется источников тока. Работа таких приёмников осуществляется только за счёт энергии электромагнитных волн, превращаемой в антенне в энергию высокочастотных токов.

Детекторные приёмники не могут обеспечить возможности приёма далёких или маломощных станций, не пригодны они и для работы репродукторов. Значительно более совершенными и мощными являются ламповые приёмники, в которых детектирование осуществляется при помощи электронной лампы.

Вся огромная мощь современной радиотехники базируется на использовании электронных ламп.

122. Простейший ламповый радиоприёмник. Схема простейшего лампового приёмника изображена на рисунке 235. В этой схеме антенна при помощи катушки L_a индуктивно связана с колебательным контуром, состоящим из катушки L и конденсатора переменной ёмкости C. Колебательный контур включён последовательно в цепь двухэлектродной электронной лампы.

Под действием пришедшей электромагнитной волны в антенне возникает модулированный высокочастотный ток с частотой,

равной частоте колебаний в этой волне. Благодаря индуктивной связи катушки L_a с катушкой L колебательного контура в последнем появляется такой же высокочастотный модулированный ток, а в цепи детектора — лампы благодаря её односторонней проводимости будет проходить пульсирующий ток переменной величины.

Пульсирующий ток является сложным током, состоящим из тока звуковой частоты и пульсирующего высокочастотного тока. Чтобы разделить эти токи и получить возможность использовать колебания тока звуковой частоты, действующие на мембрану телефона, параллельно телефону, так же как и в детекторном приёмнике (рис. 234), включается конденсатор C_b. Для токов высокой частоты конденсатор представляет малое сопротивление, телефон же — очень большое сопротивление, а для токов низкой частоты, наоборот, меньшее сопротивление представляет телефон. Поэтому ток звуковой частоты пойдёт через телефон, и мембрана воспроизведёт те звуки, которые были произнесены перед микрофоном передатчика.

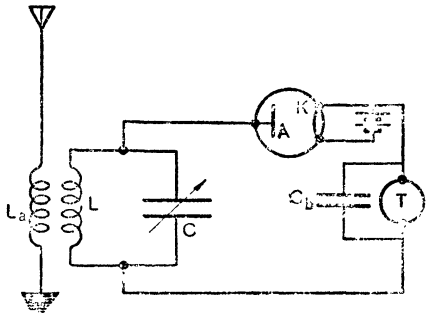


Рис. 235. Электронная лампа в роли детектора.

123. Электронная лампа в роли усилителя электромагнитных колебаний. Естественно, что при приёме дальних станций наводимая в антенне э. д. с. будет очень малой; соответственно слабым будет и звук в телефоне. Поэтому для обеспечения достаточной громкости приёма приходится индуцированные в антенне токи усиливать до их детектирования, а затем, если приёмник работает на репродуктор, усиливать токи и звуковой частоты. Таким образом, колебания сначала усиливаются на высокой частоте, а затем — на низкой звуковой частоте. Соответственно и усилители называются: первые — усилителями высокой частоты, а вторые — усилителями низкой частоты. Важно подчеркнуть, что усиление токов происходит за счёт энергии местного источника тока, а возникающие в антенне электромагнитные колебания только управляют работой этого источника.

Усиление электромагнитных колебаний может быть получено с помощью трёхэлектродных электронных ламп.

Процессы, протекающие внутри лампы как при усилении высокочастотных колебаний, так и колебаний низкой (звуковой) частоты, принципиально одинаковы. Схема усиления с одной лампой, называемая ступенью усиления, показана на рисунке 236.

В этой схеме приёмный открытый колебательный контур через катушку L_g индуктивно связывается с сеткой g лампы. При возникновении электромагнитных колебаний в приёмном контуре на-

пряжение между сеткой и катодом («сеточное напряжение») будет изменяться. Так как сетка расположена к катоду значительно ближе, чем анод, то даже незначительные изменения напряжения на сетке вызовут значительные изменения анодного тока. Таким образом, слабые колебания в контуре вызывают большие колебания величины анодного тока в цепи лампы. Источником энергии в анодной цепи лампы служит батарея B. Токи же в цепи сетки, возбуждённые электромагнитными колебаниями в антенне, лишь управляют расходом энергии этой батареи в анодной цепи лампы. Следовательно, лампа в этом случае работает как реле, управляемое с передающей станции.

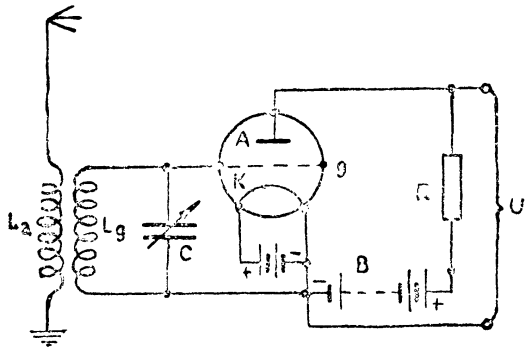


Рис. 236. Схема усиления электромагнитных колебаний с помощью трёхэлектродной лампы.

В анодную цепь лампы включён участок с сопротивлением R. Пока анодный ток имеет постоянную величину, на концах участка с сопротивлением R существует некоторое постоянное напряжение. Но если анодный ток изменяет свою величину, то вместе с тем будет изменяться и напряжение на концах этого участка. Таким образом, на участке с сопротивлением R будет существовать переменное напряжение, изменяющееся по тому же закону, как и подводимое к сетке напряжение.

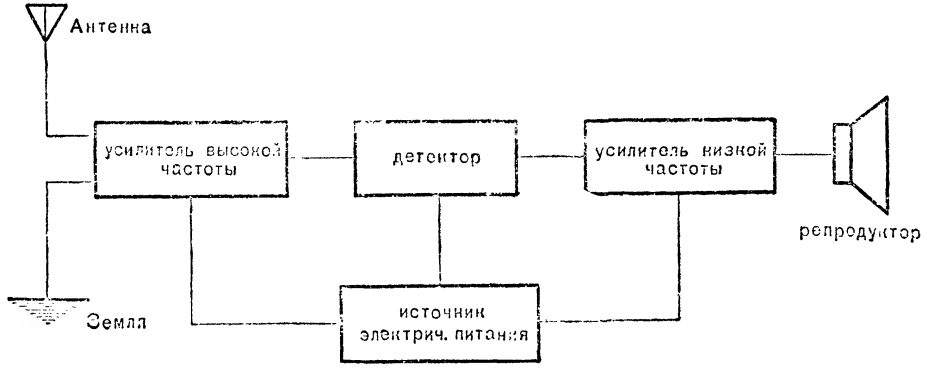


Рис. 237. Блок-схема радиоприёмника.

Переменное напряжение U, получаемое на проводнике с сопротивлением R, может быть больше, чем напряжение, подводимое к сетке. Таким образом, лампа будет усиливать подводимое к ней переменное напряжение. Напряжение U может быть подано на регистрирующие аппараты или на сетку второй лампы для дальнейшего усиления.

Усиление может осуществляться и по другим схемам. В зависимости от типа лампы и схемы включения её удаётся получать усиления в сотни раз.

Схема радиоприёмника (блок-схема), включающая все основные элементы, изображена на рисунке 237.

124. Электронно-лучевая трубка. В настоящее время широкое практическое применение получил особый вид электронных приборов — электронно-лучевая трубка.

Электронно-лучевая трубка, схематически изображённая на рисунке 238, состоит из стеклянного баллона, из которого выкачан воздух до давления порядка 10^{-6} *мм рт. ст.*, и ряда электродов.

Источником электронов в этой трубке служит накаливаемый током катод. Между катодом и анодом создаётся напряжение в несколько сот или тысяч вольт. В электрическом поле, существующем между катодом и анодом, электроны, вылетевшие из катода, ускоряются и проходят отверстие в аноде в виде тонкого пучка.

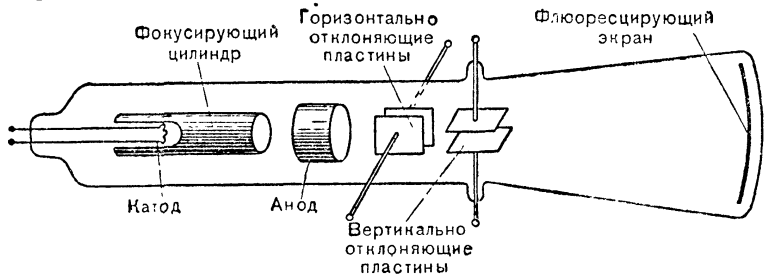


Рис. 238. Устройство электронно-лучевой трубки.

Этот пучок электронов, попадая на специальный экран, вызывает в месте удара свечение экрана в виде маленького круглого пятнышка.

Всё устройство в целом, состоящее из накаляемого катода и анода, называется электронным прожектором или электронной пушкой.

Для наблюдения электрических процессов на экране трубки узкий пучок электронов заставляют проходить между пластинами небольших конденсаторов, называемых отклоняющими пластинами.

Если на один конденсатор подано постоянное напряжение и, следовательно, между пластинами конденсатора возникло электрическое поле, то электронный луч, проходя в этом поле, будет отклоняться в направлении, противоположном направлению электрического поля.

При этом светлое пятно на экране сместится; величина смещения будет пропорциональна величине приложенного напряжения.

Если переменное напряжение приложить к вертикально отклоняющим пластинам конденсатора, то световое пятно будет совершать колебания по вертикали. Амплитуда этих колебаний будет пропорциональна амплитуде приложенного напряжения.

Чтобы выявить форму колебаний, необходимо к горизонтально отклоняющим пластинам приложить такое переменное напряжение, которое равномерно увеличивается до некоторой определённой величины, а затем очень быстро спадает до нуля, после чего этот процесс изменения напряжения повторяется. Такое напряжение называется р а з в ё р т ы в а ю щ и м.

Развёртывающее напряжение заставит электронный луч и вместе с ним световое пятно равномерно перемещаться на экране в горизонтальном направлении и затем практически мгновенно возвращаться к начальному положению. Повторение этого процесса и даёт развёртку колебаний во времени, которая выявит форму исследуемых электрических колебаний, так как результирующее движение светового пятна на экране представляет собой кривую изменения исследуемого напряжения в зависимости от времени.

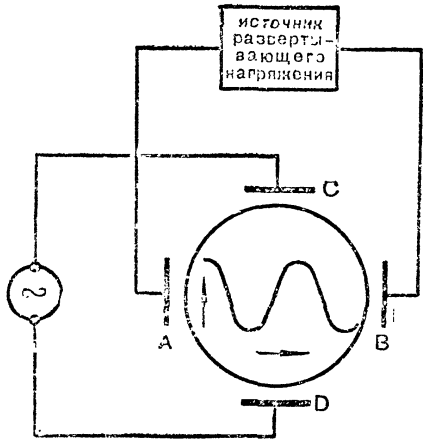


Рис. 239. Кривая напряжения переменного тока, полученная на экране электронно-лучевой трубки.

На рисунке 239 между пластинами AB изображена кривая изменения напряжения переменного тока, полученная с помощью электронно-лучевой трубки.

Практическая безынерционность электронного луча позволяет применять электронно-лучевые трубки для наблюдения и фотографирования весьма быстро протекающих электромагнитных процессов. Это обстоятельство имеет исключительное значение для исследований в области радио.

Накладывая изменяющееся со звуковой частотой напряжение на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, а на горизонтально отклоняющие пластины развёртывающее напряжение, мы можем исследовать различные звуковые колебания.

Электронно-лучевая трубка, используемая для наблюдения и фотографирования формы кривой электрических колебаний, является основной частью прибора, называемого э л е к т р о н н ы м о с ц и л л о г р а ф о м.

Электронно-лучевые трубки являются основными приборами в радиолокационных и телевизионных установках.

125. Радиолокация[1]. ***Радиолокацией называется обнаруживание различных предметов и измерение расстояния до них с помощью радиоволн.***

---

[1] Р а д и о л о к а ц и я — от лат. слов: р а д и о — излучаю и л о к у с — место.

В основе радиолокации лежит явление отражения ультракоротких радиоволн от предметов (радиоэхо), аналогичное явлению отражения звуковых волн (звуковое эхо).

Существуют сложные антенны (радиопрожекторы), обладающие способностью излучать ультракороткие радиоволны в виде узкого пучка — радиолуча.

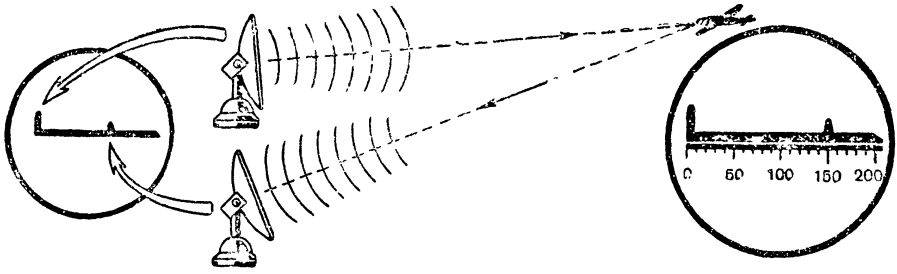


Рис. 240. Схема действия радиолокатора.

Рис. 241. Градуированная шкала радиолокатора.

Пусть радиостанция посылает в пространство радиолуч. Направление этого радиолуча можно изменять, поворачивая радиопрожектор. Встретив на своём пути, например, самолёт, радиолуч частично отразится от него и возвратится обратно (рис. 240).

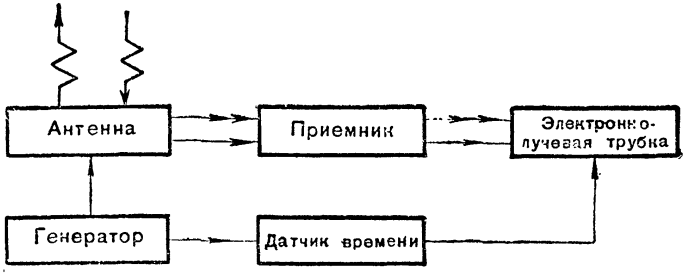


Рис. 242. Блок-схема радиолокатора.

Радиолуч посылается не непрерывно, а только в очень короткие промежутки времени, равные миллионной доле секунды, причём паузы (отсутствие радиопередачи) между отдельными сигналами длятся примерно в сто раз дольше самого сигнала. Благодаря этому во время паузы радиосигнал успевает достичь самолёта и вернуться обратно.

Измеряя время движения сигнала и зная, что он распространяется в воздухе со скоростью 299 820 *км/сек*, можно определить расстояние до самолёта.

На рисунке 242 изображена блок-схема радиолокатора; существенными частями её являются: импульсный генератор, направленная антенна, приёмник, электронно-лучевая трубка и так называемый датчик времени, смещающий электронный луч

вдоль экрана электронно-лучевой трубки. На экране электронно-лучевой трубки образуется горизонтальная светящаяся линия (рис. 241).

В момент посылки радиосигнала датчик времени начинает смещать электронный луч. Радиосигнал поступает в антенну, излучается в пространство и одновременно создаёт на экране электронно-лучевой трубки отклонение электронного луча вдоль вертикали, изображённое в левой части рисунка 241 над нулевым делением шкалы.

Отражённый от самолёта радиосигнал принимается той же антенной (на рис. 240 для ясности изображены две антенны — отправительная и приёмная), проходит через приёмник и на экране электронно-лучевой трубки даёт вертикальное отклонение луча на некотором расстоянии от первого отклонения (рис. 241).

Зная время движения луча по горизонтали, можно расстояние между вертикальными отклонениями проградуировать прямо в километрах.

Направление, в котором находится обнаруживаемый объект, определяется положением антенны радиолокатора, при котором на экране электронно-лучевой трубки появляется отражённый радиосигнал.

Современные радиолокационные станции (их часто называют «радиолокаторами») позволяют обнаружить самолёт на расстоянии нескольких сот километров и измерить расстояние до него с точностью до десятка метров, а направление на самолёт с точностью до одного-двух градусов.

Радиолокация, помимо чисто военных применений, имеет очень большое значение для мирных целей. Сюда в первую очередь относятся воздушная и морская радионавигация самолётов и кораблей. Радиолокационная техника позволяет осуществлять слепой полёт на дальние и близкие расстояния, слепую посадку на аэродром, предупреждать столкновения с другими самолётами, горами, высокими зданиями и т. п., а на море осуществлять плавание ночью, в тумане и по узким фарватерам.

РАЗДЕЛ II
ОПТИКА И СТРОЕНИЕ АТОМА

ГЛАВА VI
РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

126. Введение. Источники света. «Свет — необходимое условие для работы глаза, самого тонкого, универсального и могучего органа чувств,— писал академик С. И. Вавилов.— Ночь лишает человека этого органа, превращая жизнь из активной в пассивную.

Роль искусственного света — поддерживать деятельное, бодрствующее сознание. Свет фактически удлиняет сознательное существование человека, и в этом прежде всего его великое значение. Не удивительно поэтому, что в наше время вопрос о количестве света вырастает в очень большую технико-экономическую проблему».

Мы видим различные тела, когда от них исходит свет и попадает к нам в глаза. Одни тела мы видим независимо от того, светло вокруг нас или темно. Они сами излучают свет в окружающее пространство, такие тела называются *источниками света*.

Большинство же тел мы видим только тогда, когда они освещены источниками света.

Источники света можно разделить на естественные и искусственные. Из естественных источников света главное значение имеет для нас Солнце, так как свет, излучаемый Солнцем, является первоисточником большинства энергетических запасов, которыми располагает человечество в настоящее время. Солнечный свет является источником жизни для всех живых организмов на земле — растений, животных, человека.

Искусственные источники света, которыми человечество овладевало по мере своего развития и с которыми каждый из нас до сих пор встречается (костры, спички, свечи, керосиновые и электрические лампы), как и Солнце, всегда горячие.

Все названные выше источники испускают свет в нагретом состоянии, поэтому они называются *тепловыми источниками света*.

Наряду с тепловыми источниками в настоящее время всё шире и шире начинают проникать в технику и быт новые виды источни-

ков света, в которых используется свечение газов под действием проходящих через них электрических токов. Температура газа в таких лампах при свечении почти не меняется, поэтому их называют иногда источниками «холодного света». Они, как мы увидим далее (§ 189), значительно экономичнее электрических ламп накаливания. Кроме того, в некоторых из них можно получить свет, одинаковый по своему составу с солнечным светом. Такие лампы «дневного света» сейчас используются во многих производствах; они, в частности, служат источником света на некоторых подземных станциях метро.

Солнце находится от Земли на расстоянии 150 млн. *км*. Расстояние от Земли до звёзд значительно больше. Каким же образом свет, излучаемый Солнцем, звёздами и другими светящимися телами, распространяется в пространстве? Что такое свет? — Все эти вопросы издавна занимали человечество. В настоящее время наукой выяснено многое о природе света и законах его распространения.

В учении о свете, как, впрочем, и в любой другой области научного знания, широким теоретическим обобщениям предшествовало изучение и накопление опытных фактов и установление на основании их законов явлений. Отчётливое знание этих законов необходимо для того, чтобы глубже понять сущность учений о природе и свойствах света.

К числу основных законов оптических явлений относятся:

1) Закон прямолинейного распространения света.
2) Закон отражения света.
3) Закон преломления света.

127. Закон прямолинейного распространения света. Известно, что если поместить между глазом и каким-нибудь небольшим источником света непрозрачный предмет, то источник света делается невидимым. Объясняется это тем, что в *однородной среде* (например, в воздухе) *свет распространяется по прямым линиям*. Прямолинейность распространения света представляет собой опытный факт, установленный ещё в глубокой древности. Так, например, закон о прямолинейности распространения света излагается уже в сочинении Евклида (300 лет до нашей эры), но, вероятно, он был известен гораздо раньше.

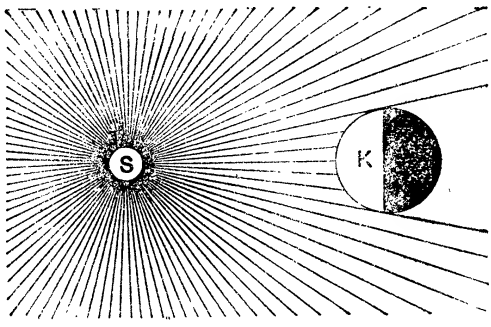


Рис. 243. Образование тени.

Прямолинейностью распространения света в однородной среде объясняется всем хорошо известное явление образования тени.

Пусть S (рис. 243) есть очень маленький по размеру источник света, а K — тело, преграждающее путь падающему на него от S свету.

Так как свет распространяется прямолинейно, то он задерживается телом K; в результате за этим телом образуется конус тени. Каждая точка внутри этого конуса не получает света от источника света S. Поэтому на экране, помещённом под прямым углом к оси такого конуса, и получается хорошо очерченная тень тела K.

Если размеры источника света велики по сравнению с расстоянием от него до препятствий, то свет от каждой точки тела даёт отдельный конус тени позади препятствия. Свет совершенно не попадает лишь в пространство, общее всем этим конусам тени. На рисунке 244 показано сечение конусов тени, образованных за телом B светом, распространяющимся из двух точек источника света S. В пространство BC свет не попадает ни от одной из точек светящегося тела S. Каждая же точка пространства, окружающего конус BC, получает свет только от некоторых точек тела S, от других же не получает. Если между B и C поместить экран NN, то на нём мы увидим тень, окружённую полутенью.

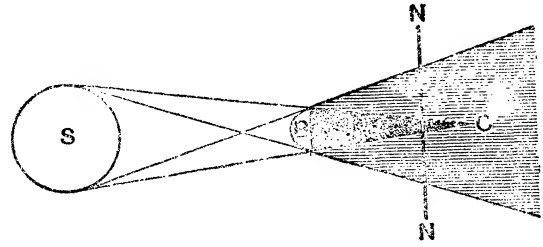


Рис. 244. Непрозрачное тело, освещаемое двумя светящимися точками, даёт тень и полутень.

Образование тени при падении лучей от источника света на непрозрачный предмет объясняет нам такие явления, как затмение Солнца и Луны.

Свойство прямолинейности распространения света используется в землемерных работах при провешивании прямых линий на поверхности земли, при определении расстояний на земле, на море и в воздухе.

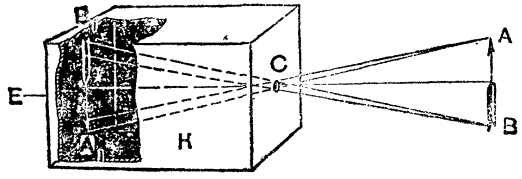


Рис. 245. Получение изображения с помощью малого отверстия.

Широко используется прямолинейность распространения света в производстве при контроле по лучу зрения прямолинейности изделий и инструментов.

Весьма вероятно, что понятие о прямой линии возникло из факта прямолинейности распространения света.

Прямолинейностью распространения света объясняется возможность получения изображений с помощью малого отверстия.

Положим, что AB представляет собой светящийся предмет, помещённый перед малым отверстием C в стенке камеры K (рис. 245). Так как свет распространяется прямолинейно, то от каждой точки предмета AB через отверстие C будет проходить свет, который на стенке E камеры образует небольшое пятнышко. Совокупность таких пятнышек, полученных от разных точек, образует на стенке камеры E изображение A_1B_1 предмета, которое по отношению к предмету будет перевёрнутым.

Однако закон прямолинейности распространения света теряет свою силу при прохождении через очень малые отверстия. Познакомимся с этим явлением на опыте. Будем уменьшать отверстие C и наблюдать при этом за изображением A_1B_1. Мы заметим, что с уменьшением размера отверстия отчётливость изображения A_1B_1 сначала возрастает, уменьшается только его яркость, так как при уменьшенном отверстии меньше поступает и света. Но когда размер отверстия становится очень малым (в нашем опыте $d \approx 0{,}01$ *мм*), изображение теряет подобие предмета и при дальнейшем уменьшении отверстия становится размытым, а при диаметре отверстия порядка 0,0005 *мм* совершенно исчезает. Экран E камеры становится при этом слабо, но равномерно освещённым. Объясняется это тем, что при прохождении светом очень малых отверстий прямолинейность распространения его нарушается.

Явление, при котором наблюдается нарушение прямолинейности распространения света, называется дифракцией света, оно будет рассмотрено в главе IX.

128. Скорость света. В пределах земной поверхности скорость света определялась разными методами. Чтобы уяснить идею

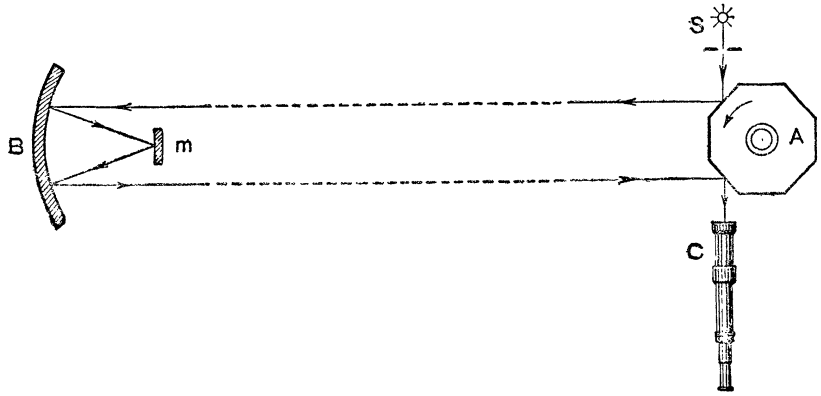


Рис. 246. Схема опыта Майкельсона по определению скорости света.

подобных измерений, опишем опыт американского учёного Майкельсона.

Для своих измерений Майкельсон воспользовался двумя горными вершинами: Антонио и Вильсон (в Калифорнии), расстояние между которыми (35,426 *км*) было тщательно измерено. На вершине горы Вильсон был установлен сильный источник S

(рис. 246), свет от которого, проходя через щель, падал на восьмигранную зеркальную призму A. Отражённый от зеркальной грани призмы свет попадал на вогнутое зеркало B, установленное на вершине горы Антонио. Далее свет падал на зеркало m и, отражаясь от него, падал на другую точку зеркала B, после чего попадал на вторую грань зеркальной призмы A и отражался. Отражённый свет улавливался с помощью зрительной трубы C. Вышедший из щели свет мог попасть в зрительную трубу только при том условии, если за время распространения света с одной горы на другую и обратно в расположении зеркал ничего не изменилось.

Зеркальная призма A при помощи мотора приводилась во вращение, причём скорость мотора регулировалась так, чтобы через зрительную трубу щель S была видна непрерывно. Это могло быть только при том условии, если за время поворота призмы на $\frac{1}{8}$ оборота свет проходил путь, равный двойному расстоянию между вершинами гор. Зная число оборотов зеркала в секунду и пройденный светом путь, Майкельсон нашёл, что скорость света в воздухе

$c=(299\,796 \pm 4)\frac{км}{сек}$, т. е. почти $300\,000\frac{км}{сек}=3\cdot 10^{10}\frac{см}{сек}$.

Скорость света в различных веществах, как показывают опыты, неодинакова. В воде, например, скорость света около $225\,000\frac{км}{сек}$, в стекле около $200\,000\frac{км}{сек}$.

129. Световой поток. Точечный источник света. Энергия света оценивается по зрительному восприятию. Если на какую-либо площадку в течение времени t падает свет, энергия которого равна L, то величина $\frac{L}{t}$ называется световым потоком (Φ):

$$\Phi=\frac{L}{t}.$$

Количество энергии, излучаемой каким-либо источником света в единицу времени по всем направлениям, называется полным световым потоком источника (Φ_0).

Световой поток выражает собой величину мощности светового излучения.

Представим себе, что источником света является небольшой раскалённый шарик. Такой источник будет излучать свет по всем направлениям равномерно, а если действие света, излучаемого им, мы будем оценивать на расстоянии, значительном по сравнению с диаметром шарика, то размеры его не будут играть никакой роли. В этом случае источник света можно считать точечным.

Таким образом, ***точечным источником света называется источник, излучающий свет по всем направлениям***

равномерно и размерами которого по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие, можно пренебречь.

На практике мы всегда имеем дело с протяжёнными телами, в том числе и с протяжёнными источниками света. Каждый из таких источников можно рассматривать как совокупность светящихся точек. Чем меньше размеры светящегося тела в сравнении с расстоянием, на котором мы оцениваем его действие, тем с меньшей погрешностью можно принимать его за светящуюся точку.

130. Сила света. Для характеристики источника света в светотехнике применяется величина, называемая силой света.

Представим себе точечный источник света и опишем вокруг него радиусом r шаровую поверхность. Вообразим внутри этого шара конус, вершина которого находится в центре шара. Такой конус вырезает на поверхности шара некоторую часть шаровой поверхности σ (рис. 247).

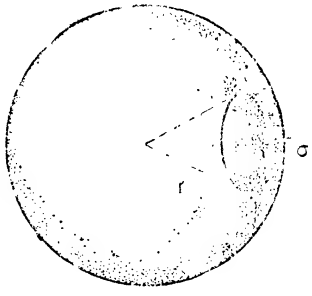


Рис. 247. Телесный угол ω измеряется отношением поверхности σ, вырезанной на сфере конусом, к квадрату радиуса r сферы.

Пространство, ограниченное конической поверхностью, называется телесным углом.

Телесный угол ω измеряется отношением $\frac{\sigma}{r^2}$. Если $\sigma=r^2$, то телесный угол равен единице и называется стерадианом. Так как величина шаровой поверхности равна $4\pi r^2$, то телесный угол вокруг точки равен 4π стерадианам.

Силой света (I) источника называется величина, измеряемая отношением светового потока Ф к величине телесного угла ω, в котором этот поток распространяется:

$$I=\frac{\Phi}{\omega}.$$

Следовательно, сила света измеряется тем световым потоком, который распространяется в 1 стерадиане.

Из определения точечного источника следует, что сила света точечного источника одинакова по всем направлениям. Сила же света таких источников, как лампа накаливания, дуговой фонарь и т. п., различна по различным направлениям. Применяя соответствующую арматуру, мы можем излучаемый источником поток направить так, как нам желательно. Концентрируя полный поток источника в небольшом телесном угле, мы получаем громадную силу света в одном каком-нибудь направлении. На этом принципе основано устройство современных прожекторов.

131. Освещённость. Читаем ли мы книгу, пишем ли, работаем ли у какого-нибудь станка, всегда объект, над которым мы трудимся, должен быть так или иначе освещён. Всем известно, на-

пример, что чтение при слабом свете утомляет глаза. Также утомляются глаза при очень сильном свете. Но слабый и сильный — понятия относительные и субъективные. Для объективной оценки освещения в светотехнике введена величина освещённости. ***Освещённостью E называется величина, измеряемая отношением светового потока Ф, падающего на какую-либо поверхность, к величине площади этой поверхности S:***

$$E=\frac{\Phi}{S}.$$

При равномерном распределении потока на поверхности освещённость численно равна световому потоку, падающему на единицу площади.

132. Единицы светотехнических величин. Основной светотехнической величиной является световой поток. Однако на практике в качестве основной единицы принята единица силы света. ***По международному соглашению за единицу силы света принята свеча (св). Свеча — определённая часть силы света, даваемого эталонной лампой накаливания особого устройства*** (рис. 248) ***в строго определённом направлении.***

Так как $I=\frac{\Phi}{\omega}$,

то $$\Phi=I\,\omega.$$

Полагая $I=1$ ед. силы света и $\omega=1$ ед. угла, получим $\Phi=1$ ед. светового потока.

За единицу светового потока принимается люмен (*лм*).

Люменом называется световой поток, излучаемый точечным источником света в 1 свечу внутри телесного угла в один стерадиан [1].

Если световой поток в 1 *лм* равномерно распределяется на единице площади поверхности, то освещённость равна единице.

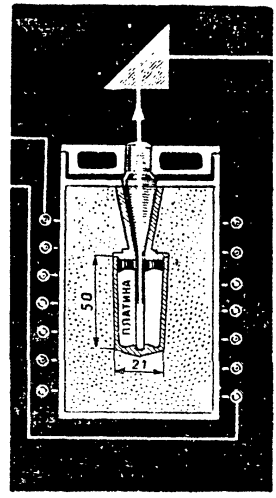


Рис. 248. Эталон международной свечи.

За единицу освещённости принимают люкс (*лк*); *люкс — освещённость, создаваемая равномерно распределённым световым потоком в 1 лм на поверхности в 1 м²:*

$$1\ \text{люкс}=\frac{1\ лм}{1\ м^2}.$$

[1] В 1948 г. в СССР введён световой эталон. Этот эталон представляет собой узкую трубочку определённых размеров. Световой поток, излучаемый открытым концом этой трубочки при определённых температурных условиях, называется люменом.

Чрезвычайно важное значение для производительности труда и сохранения зрения имеет надлежащая освещённость места работы. Установлены различные нормы освещённости для разных видов работы.

В качестве примера ниже приводятся значения некоторых освещённостей, встречающихся на практике:

	Люксы
Освещённость, необходимая для чтения	30—50
» стола для тонких работ	100—200
» при съёмке в киноателье	10000 и более
» на экране кино	20—80
» на открытом месте в пасмурный день	1000 и более
» в ясный полдень на солнце	100000
» от полной луны	0,2

133. Законы освещённости. Свет, исходящий из точечного источника, будет различным образом освещать предметы, находящиеся на разных расстояниях от источника. Чем дальше освещаемая поверхность находится от источника S, тем меньший световой поток приходится на каждую единицу этой поверхности (рис. 249), а следовательно, тем меньше её освещённость. Совершенно очевидно, что при одинаковых расстояниях от источника освещённость зависит также от силы света источника.

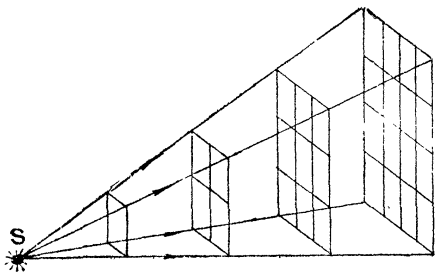


Рис. 249. Освещённость поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния её от источника.

Установим эту зависимость. Пусть имеется точечный источник света силой I. Опишем вокруг него радиусом r шаровую поверхность S. Освещённость этой поверхности ($S=4\pi r^2$) равна:

$$E=\frac{\Phi_0}{4\pi r^2}. \qquad (1)$$

Если сила света источника I, то полный световой поток $\Phi_0=4\pi I$. Подставляя это значение Φ_0 в формулу (1), получим:

$$E=\frac{I}{r^2}.$$

В рассматриваемом случае лучи перпендикулярны к любому элементу освещаемой поверхности.

Итак, ***освещённость поверхности лучами, падающими на неё перпендикулярно, прямо пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния его от освещаемой поверхности*** *(это первый закон освещённости).*

Этот закон строго выполняется в случае точечного источника света. На практике расчётные результаты, основанные на этом законе, тем ближе к опытным данным, чем меньших размеров ис-

точник и чем больше расстояние от него до освещаемой поверхности.

Кроме указанных факторов, освещённость зависит ещё и от угла, под которым свет падает на освещаемую поверхность.

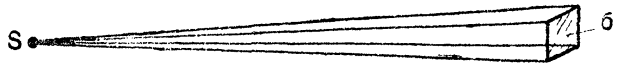


Рис. 250. Лучи, падающие на небольшую площадку *б* на достаточно большом расстоянии от точечного источника *S*, практически будут параллельными.

Возьмём небольшой по размерам источник света *S*. Лучи, падающие от него на небольшую площадку *б* на достаточно большом расстоянии, будут практически параллельными (рис. 250). Если эту площадку наклонить, то на неё попадёт только часть светового потока.

Установим зависимость освещённости площадки от угла наклона её к падающим лучам.

На рисунке 251 один и тот же поток света падает на две прямоугольные площадки AC и AB, расположенные перпендикулярно плоскости чертежа. Пусть высоты этих прямоугольных площадок равны 1 *см*, тогда площади их в квадратных сантиметрах численно будут равны длинам линий AC и AB. На площадке AC, расположенной перпендикулярно к падающим лучам света, распределён световой поток Φ, тогда освещённость этой площадки будет:

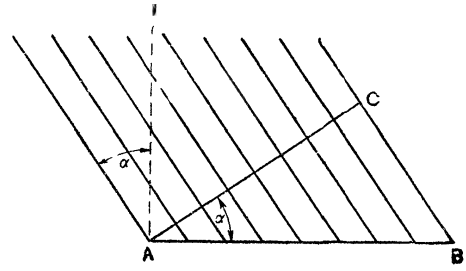


Рис. 251. Освещённость площадки пропорциональна косинусу угла, образуемого нормалью к площадке с направлением светового потока.

$$E_0 = \frac{\Phi}{AC}.$$

Аналогично для площадки AB:

$$E = \frac{\Phi}{AB}. \qquad (1)$$

Сравним освещённости E_0 и E:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{AB}{AC}; \quad E = E_0 \frac{AC}{AB}, \text{ но } \frac{AC}{AB} = \cos\alpha,$$

поэтому

$$E = E_0 \cos\alpha.$$

Освещённость поверхности пропорциональна косинусу угла падения лучей *(второй закон освещённости).*

Если E_0 — освещённость площадки перпендикулярными лучами света, то она равна $\frac{I}{r^2}$; тогда освещённость может быть вычислена по формуле:

$$E=\frac{I}{r^2}\cos\alpha.$$

Эта формула объединяет оба закона освещённости.

134. Сравнение силы света двух источников. Приборы для сравнения силы света называются фотометрами. Пусть S_1 и S_2 — источники, сила света которых равна I_1 и I_2 (рис. 252). Установим между ними экран A так, чтобы освещённости какой-нибудь небольшой поверхности экрана справа и слева были равны:

$$E_1=E_2; \qquad (1)$$

$$E_1=\frac{I_1}{r_1^2} \text{ и } E_2=\frac{I_2}{r_2^2}.$$

Отсюда на основании равенства (1) можно написать:

$$\frac{I_1}{r_1^2}=\frac{I_2}{r_2^2}, \text{ или } \frac{I_1}{I_2}=\frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

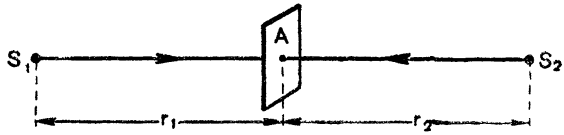


Рис. 252. К сравнению силы света двух источников.

Если вместо одного источника света поместить эталонную лампу и, установив равенство освещённостей экрана, измерить расстояния r_1 и r_2, то можно определить силу света второго источника.

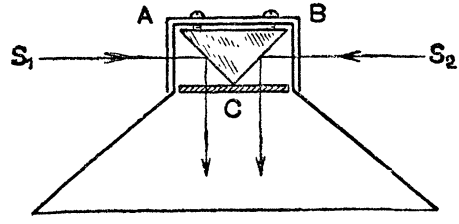


Рис. 253. Схема простейшего фотометра.

Схема одного из простейших фотометров показана на рисунке 253. На белые грани BC и AC треугольной призмы ABC падает свет от источников S_1 и S_2. Перемещением фотометра между

ними добиваются одинаковой освещённости граней BC и AC, это будет тогда, когда при наблюдении обе грани окажутся слившимися в одну; граница между ними исчезает.

Упражнение 16.

1. Определите приблизительно освещённость вашего рабочего места дома и в школе; сравните с нормами, приведёнными в § 132. Расчёты будут более близки к истине, если освещение производится лампочками без абажуров. Почему?

2. Согласно нормам освещения на рабочем месте металлиста, выполняющего тонкую работу, должна быть освещённость 100 *лк*. На какой высоте над рабочим местом должна быть помещена лампа в 100 *св*.?

3. В качестве эталона силы света взяли 25-свечную лампу, помещённую на расстоянии 20 *см* от фотометра. Какова сила света исследуемой лампы, если её пришлось поместить на расстоянии 0,5 *м* от фотометра?

4. Солнце находится на высоте 30° над горизонтом. Вычислить освещённость земной поверхности в люксах, если известно, что при нахождении Солнца в зените освещённость земной поверхности равна 100 000 *лк*.

5. Почернение фотографической бумаги определяется произведением освещённости бумаги на время экспозиции. Во сколько раз и как надо изменить время экспозиции, если расстояние бумаги от источника света увеличится втрое?

ГЛАВА VII

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

135. Световой луч. Световой пучок. *Световым лучом называется то направление, по которому распространяется свет.* Так как светящаяся точка испускает свет по всем направлениям, то любая прямая, проведённая из этой точки, представляет световой луч.

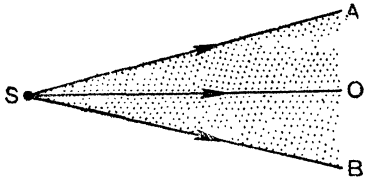


Рис. 254. Световой пучок изображён тремя лучами: осевым *SO* и лучами *SA* и *SB*, ограничивающими пучок.

Из нашего определения ясно, что световой луч есть понятие чисто геометрическое.

На практике свет всегда распространяется внутри прямолинейно ограниченного конуса, в виде светового пучка.

На рисунке 254 световой пучок изображён тремя лучами: осевым *SO* и лучами *SA* и *SB*, ограничивающими пучок.

Пучок света в чистом воздухе невидим; но если воздух содержит мелкие частички — пылинки, дым или мелкие капельки воды (туман), то благодаря освещённым частичкам пучок света становится видимым.

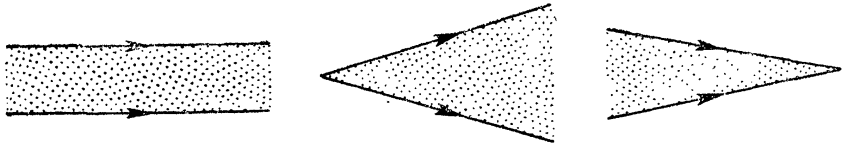


Рис. 255. Параллельный, расходящийся и сходящийся пучки света.

Во всяком действительном опыте, как уже указывалось, мы имеем дело не со световым лучом, а со световым пучком. Смотря по тому, как он ограничен, мы различаем параллельный, расходящийся и сходящийся пучки (рис. 255).

При помощи диафрагм ширина пучка может быть сделана малой, но не произвольно малой. При уменьшении размеров отверстия диафрагмы, через которое проходит пучок лучей, прямолинейность лучей постепенно нарушается — свет начинает заходить в область тени (на это же указывалось в § 127).

Наш глаз обычно воспринимает расходящиеся пучки лучей, и в месте пересечения этих лучей мы видим светящуюся точку. При этом возможны два случая: 1) точка пересечения лучей действительно существует; тогда видимую светящуюся точку называют действительной; 2) расходящийся пучок лучей не имеет действительной точки пересечения, но глазу она представляется существующей в месте пересечения воображаемых продолжений расходящихся лучей; такая точка называется мнимой. Однако ничего мнимого здесь нет. Где-то существует реальная светящаяся точка, из которой вышли лучи, попавшие в наш глаз. Но не всегда мы видим её там, где на самом деле она находится, и в этом смысле употребляется термин «мнимая точка».

Отдел учения о свете, в котором явления распространения света рассматриваются на основе представлений о световом луче, называется геометрической или лучевой оптикой.

136. Явления, происходящие при падении света на тела. Когда свет падает на какое-нибудь тело, то, во-первых, часть падающего света отражается от поверхности тела. Такое явление называется отражением света.

Во-вторых, часть света проникает внутрь тела и может распространяться в нём дальше. При этом на поверхности тела эта часть света может изменить первоначальное направление и дальше в теле распространяться по другому направлению. Это явление называется преломлением света.

Если сложить отражённый и преломлённый световые потоки, то их сумма будет равна величине полного светового потока, падающего на тело. Но в процессе распространения света внутри тела интенсивность света постепенно уменьшается вследствие поглощения его средой. При этом световая энергия превращается в другие виды энергии, в частности, она может перейти во внутреннюю энергию тела. Хорошо известно, например, что под действием света тела нагреваются.

Относительная величина отражённого и преломлённого света определяется рядом факторов: веществом тела, состоянием его поверхности, составом самого света, углом падения и др.

Поглощение также зависит от вещества тела и от состава светового потока.

Итак, ***при падении света на поверхность тела можно наблюдать явления отражения и преломления, а при прохождении его в теле — явление поглощения света.***

137. Законы отражения света. Познакомимся с законами отражения света на опыте.

Установим плоское зеркальце PP в центре кругового диска, разделённого на градусы, так, чтобы лучи падали к основанию перпендикуляра CN, восставленного к плоскости зеркальца (рис. 256). Пусть SC — падающий луч, а CS_1 — отражённый луч. Точка C — точка падения луча. Угол SCN между падающим лучом SC и перпендикуляром CN называется углом падения. Угол

S_1CN между отражённым лучом S_1C и тем же перпендикуляром CN называется углом отражения.

Из опыта видно, что луч падающий и луч отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к зеркалу, проведённым из точки падения луча.

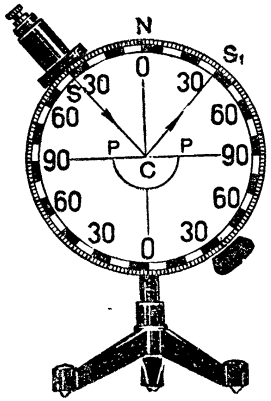


Рис. 256. Прибор для установления закона отражения света.

Вращая диск, будем менять угол, под которым падает луч на зеркальце, мы заметим, что при этом меняется и угол отражения.

Измеряя каждый раз угол падения и соответствующий ему угол отражения, можно установить, что они равны друг другу.

Таким образом, отражение света происходит по следующим законам:

1. Отражённый луч лежит в той же плоскости, в которой лежат падающий луч и перпендикуляр к отражающей поверхности, восставленный в точке падения луча.

2. Угол отражения равен углу падения.

Если падающий луч идёт по направлению S_1C, то, строя ход отражённого луча согласно сформулированным выше законам отражения, найдём, что отражённый луч пойдёт по CS. Следовательно, *падающий и отражённый лучи света взаимообратимы.*

138. Диффузное и зеркальное отражения. Громадное большинство видимых нами тел не являются источниками света и видимы только в том случае, если на них попадает свет от какого-либо источника. Но видеть предметы мы можем только тогда, когда к нам в глаз попадают лучи света. Таким образом, мы приходим к тому выводу, что освещённые тела отражают свет. При этом следует различать рассеянное (диффузное) отражение от зеркального отражения.

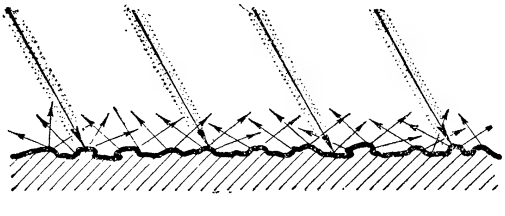


Рис. 257. Рассеянное (диффузное) отражение света от неровной поверхности.

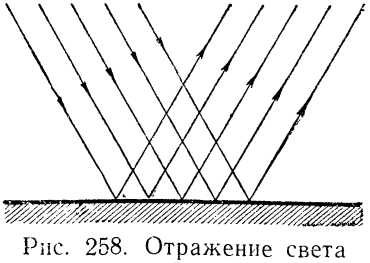


Рис. 258. Отражение света от зеркальной поверхности.

При рассеянном отражении отражённые от предмета лучи распространяются во все стороны, вследствие чего предмет мы видим со всех сторон. Диффузно отражает свет, например, обычный лист бумаги (рис. 257).

Диффузно отражающую поверхность можно представить в виде элементарных плоскостей, различно расположенных и пересекающихся под различными углами. Но если падающий на тело параллельный пучок лучей света отражается в одном определённом направлении, то в этом случае мы говорим о зеркальном отражении (рис. 258). Зеркально отражают свет, например, тщательно отполированные металлы.

139. Плоское зеркало. Плоским зеркалом называют плоскую поверхность, зеркально отражающую свет.

Пусть *MN* (рис. 259) — плоское зеркало, *S* — светящаяся точка, находящаяся перед зеркалом. Из этой точки лучи выходят по разным направлениям: *SA*, *SB*, *SC* и т. д. От поверхности зеркала эти лучи отражаются и идут по направлениям *AD*, *BE*, *CF* и т. д.

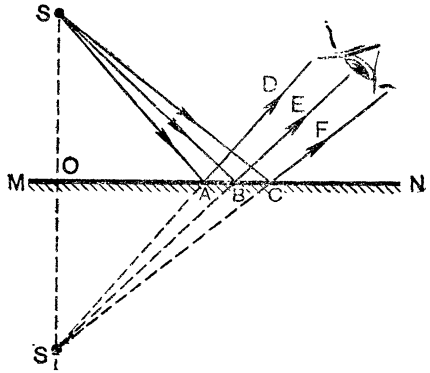


Рис. 259. Образование мнимого изображения точки в плоском зеркале.

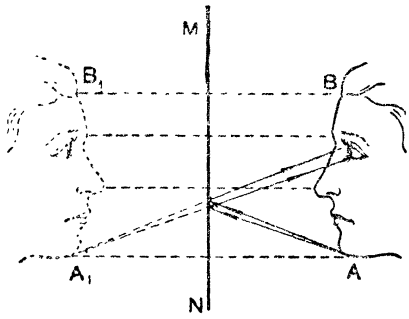


Рис. 260. Образование мнимого изображения лица в плоском зеркале.

расходящимся пучком. Если такой расходящийся пучок лучей попадёт в глаз, то нам будет казаться, что эти лучи выходят из точки S_1, находящейся на пересечении продолжения этих лучей за зеркалом. Нетрудно доказать из равенства прямоугольных треугольников SOA и S_1OA, что точка S_1 находится за зеркалом на таком же расстоянии от него, на каком точка S находится перед зеркалом.

Две точки S и S_1 называются симметричными по отношению к плоскости зеркала, причём точка S_1 называется мнимым изображением светящейся точки S.

Зная, как строится изображение светящейся точки, легко построить изображение предмета. Пусть AB — лицо (рис. 260), находящееся перед зеркалом *MN*. Все точки этого лица дадут симметричные мнимые изображения за зеркалом. Так, например, изображением точки A будет точка A_1, точки B — точка B_1 и т. д. Изображение всего лица AB в зеркале будет иметь ту же величину, что и само лицо, и будет расположено симметрично ему.

Изображение предмета в плоском зеркале, так же как и изображение точки, будет мнимым.

140. Вогнутое сферическое зеркало. Сферическое зеркало представляет собой тщательно отполированную поверхность шарового сегмента. Сферические зеркала бывают вогнутыми и выпуклыми. Центр шаровой поверхности C называется оптическим центром зеркала (рис. 261); вершина шарового сегмента O — полюсом зеркала.

Всякая прямая, проходящая через оптический центр зеркала C, называется оптической осью зеркала. Оптическая ось CO, проходящая через центр сферы C и полюс зеркала O, называется главной оптической осью.

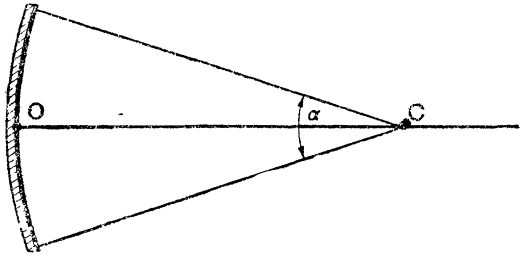


Рис. 261. Вогнутое сферическое зеркало.

Угол α, образуемый двумя лежащими в одной плоскости с осью радиусами, проведёнными к краям зеркала, называется угловым отверстием зеркала или апертурой.

Лучи, идущие вблизи главной оптической оси, называются осевыми или центральными лучами. Все наши дальнейшие выводы будут относиться именно к таким лучам.

Если на вогнутое зеркало пустить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то лучи эти, отразившись от зеркала, сойдутся в небольшой области пространства, лежащей на оси приблизительно на середине радиуса.

Если такой опыт произвести с солнечными лучами и поместить в то место, в котором сходятся отражённые от зеркала лучи, какое-нибудь тело, то оно будет сильно освещено и даже нагреется, а легко воспламеняющееся вещество может даже загореться.

По этой причине вогнутые зеркала называются собирающими.

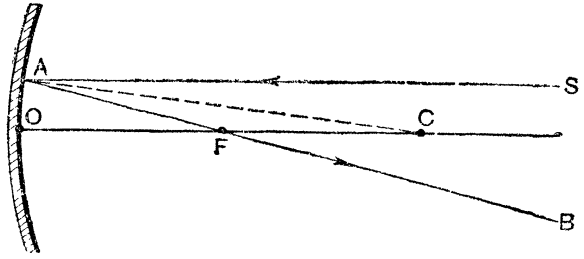


Рис. 262. К понятию фокуса вогнутого зеркала.

141. Фокус вогнутого сферического зеркала. Пусть на вогнутое зеркало падает осевой луч SA параллельно главной оптической оси зеркала OC (рис. 262). Проведём из центра C сферической поверхности зеркала перпендикуляр CA и построим отражённый луч AB. Этот луч пересечёт оптическую ось в точке F. Легко показать, что эта точка расположена на половине расстояния OC, т. е. $OF=FC=\frac{1}{2}R$, где R — радиус сферической поверхности зеркала.

В самом деле, $\angle SAC = \angle ACO$, как внутренние накрест лежащие углы. Но $\angle SAC$ есть угол падения луча, следовательно, и угол отражения луча $\angle CAB = \angle ACO$. В треугольнике CFA $CF = AF$, но так как луч SA — центральный луч, то точки A и O близки друг другу, а это значит, что $OF = AF$; отсюда $OF = FC = \frac{1}{2} R$, что и требовалось доказать.

Точка F, в которой центральный луч, параллельный главной оптической оси зеркала, после отражения пересекает эту ось зеркала, называется фокусом зеркала.

Расстояние OF от вершины зеркала до фокуса называется фокусным расстоянием. Для краткости оно обозначается одной буквой F.

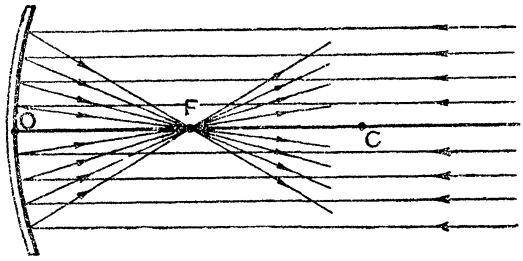


Рис. 263. Пучок лучей, падающих на вогнутое зеркало параллельно главной оптической оси, после отражения от зеркала собирается в фокусе.

В фокусе собирается после отражения от зеркала весь центральный пучок лучей, падающий на зеркало параллельно главной оптической оси зеркала (рис. 263).

Плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется фокальной плоскостью.

На рисунке 264 светящаяся точка S расположена перед вогнутым зеркалом. Проведём от неё к зеркалу три центральных луча

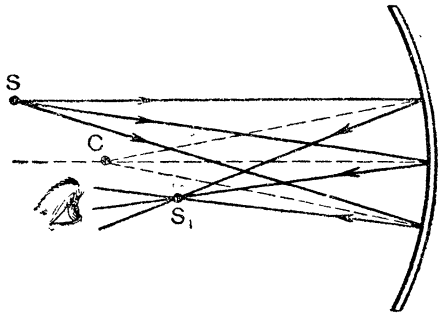


Рис. 264. Построение изображения точки в вогнутом зеркале.

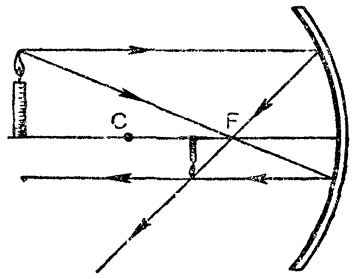


Рис. 265. Изображение свечи в вогнутом зеркале.

и, согласно законам отражения, построим отражённые лучи. Все три отражённых луча пересеклись в одной точке S_1. Так как мы взяли три произвольных центральных луча, то и все прочие центральные лучи, исходящие из точки S, тоже пересекутся в точке S_1. В таком случае S_1 будет изображением точки S. Если расположить глаз так, как показано на рисунке 264, то мы увидим в точ-

ке S_1 светящуюся точку. Следовательно, после отражения от зеркала центральные лучи, исходящие из различных точек предмета, должны пересечься в соответствующих точках и совокупность их — образовать изображение предмета. Проверим это на опыте.

Установив зажжённую свечу перед зеркалом примерно так, как показано на рисунке 265, и расположив соответствующим образом глаз, мы действительно увидим перед зеркалом (при данном расположении свечи относительно зеркала) уменьшённое и обратное изображение свечи. Если там, где мы увидели изображение, поместить лист белой бумаги, то на нём получится изображение пламени свечи, видное со всех сторон, так как белый лист бумаги отражает свет диффузно.

Таким образом, опыт подтверждает наше предположение, что все центральные лучи, исходящие из одной точки, после отражения от вогнутого зеркала пересекаются тоже в одной точке.

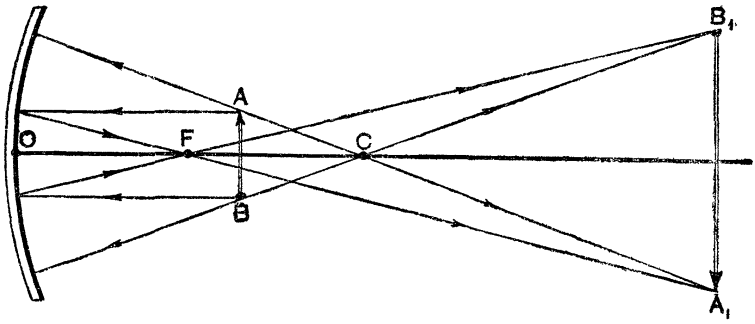


Рис. 266а. Построение изображения предмета в вогнутом зеркале: предмет находится между фокусом и оптическим центром зеркала; изображение действительное, увеличенное.

142. Построение изображений в вогнутом зеркале. Мы видели (§ 141), что все центральные лучи, исходящие из светящейся точки после отражения от сферического зеркала, пересекаются в одной точке, т. е. после отражения от зеркала «точечный» источник света даёт точечное изображение.

Поэтому для изображения точки достаточно знать направление распространения только двух лучей, выходящих из этой точки: их точка пересечения будет точкой пересечения и других лучей, исходящих из данной точки. Лучи эти могут быть выбраны совершенно произвольно, но удобнее всего пользоваться определёнными лучами, направление распространения которых после отражения заранее известно. Изображение предмета складывается из совокупности изображений отдельных точек этого предмета.

Допустим, что нам нужно построить изображение предмета AB в вогнутом зеркале (рис. 266а).

Проводим из точки A два луча: один — параллельно главной оптической оси, второй — через оптический центр C, после отра-

жения от зеркала первый пройдёт через фокус F, второй — обратно по тому же направлению. Через точку пересечения этих лучей A_1 пройдут и все остальные лучи, выходящие из точки A и отразившиеся от зеркала: точка A_1 будет изображением точки A. Таким же образом построим и изображение точки B, это будет точка B_1. Изображения остальных точек предмета AB расположатся между точками A_1 и B_1 и, следовательно, A_1B_1 будет изображением предмета AB.

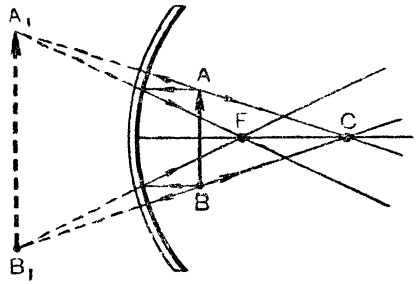


Рис. 266б. Предмет находится между фокусом и зеркалом; изображение увеличенное и мнимое.

На рисунке 266б предмет AB находится между фокусом и зеркалом. Изображение предмета A_1B_1 — увеличенное и мнимое.

В зависимости от положения предмета по отношению к зеркалу его изображения могут быть действительные и мнимые, прямые и обратные, увеличенные и уменьшённые. На рисунке 267 показана установка для получения изображений лампочки в вогнутом зеркале.

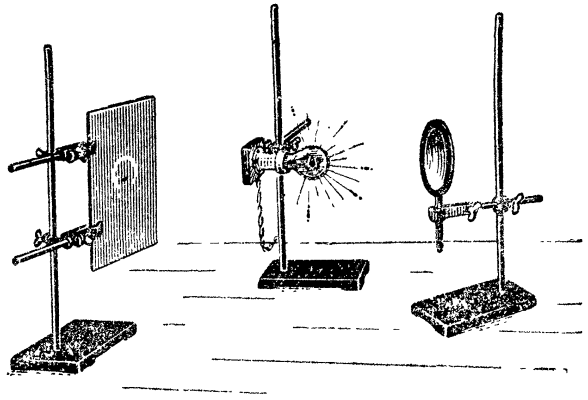


Рис. 267. Установка для получения изображений лампочки в вогнутом зеркале.

143. Применение вогнутых зеркал. Вогнутые зеркала находят весьма широкое применение в науке и технике. Например, вогнутыми зеркалами пользуются в тех случаях, когда нужно направить в какое-либо место концентрированный пучок света. Так устраиваются осветители в автомобильных, проекционных и карманных фонарях. В каждом из них за источником света помещается вогнутое зеркало. Примером может служить автомобильная фара, изображённая на рисунке 268.

Вогнутые зеркала (параболические) находят чрезвычайно важное применение при устройстве прожекторов. Прожектор

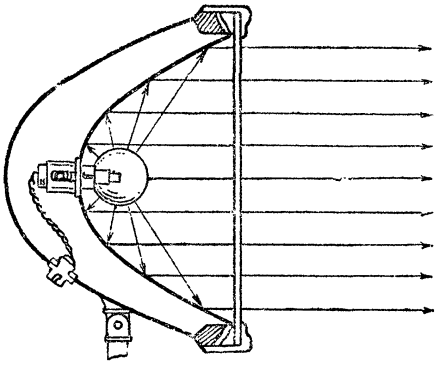


Рис. 268. Схема устройства автомобильной фары.

состоит из двух главных частей: мощного источника света (электрической дуги) и большого вогнутого зеркала, помещаемого сзади источника света так, чтобы источник света оказался в фокусе зеркала.

Прожектор как осветитель применяется при киносъёмках, при освещении строительных площадок, стадионов, площадей.

В военном деле прожекторы употребляются для освещения и сигнализации.

Вогнутые зеркала находят весьма важное применение при устройстве телескопов-рефлекторов.

144. Выпуклое зеркало. Пусть MN — выпуклое зеркало (рис. 269). Поместим перед ним светящуюся точку S и построим

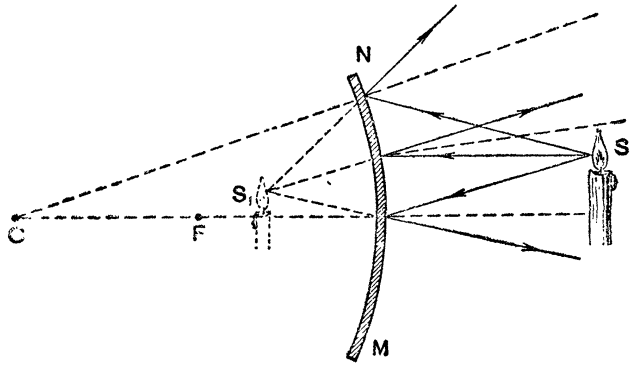


Рис. 269. Построение мнимого изображения точки в выпуклом зеркале.

её изображение. Лучи от этой точки после отражения идут расходящимся пучком. Вершина этого пучка лежит за зеркалом в точке пересечения продолжения расходящихся лучей S_1. В этой точке, как было уже указано в § 135, мы и увидим мнимое изображение светящейся точки S. Где бы предмет ни находился относительно выпуклого зеркала, его изображение в зеркале всегда мнимое и уменьшенное. Построение изображения предмета в выпуклом зеркале показано на рисунке 270; здесь AB — предмет, а A_1B_1 — его изображение.

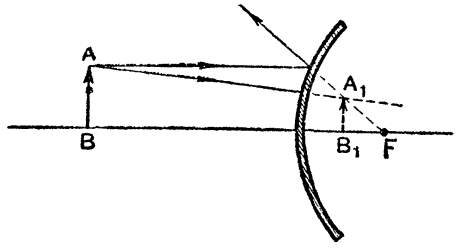


Рис. 270. Построение мнимого изображения предмета в выпуклом зеркале.

Упражнение 17.

За дверцей кабинки шофёра имеется вертикально поставленное зеркало, в которое шофёр наблюдает за тем, что делается сзади его автомобиля. Какое это должно быть зеркало: плоское, вогнутое или выпуклое? Ответ обоснуйте.

145. Законы преломления света. Когда луч света падает на гладкую поверхность прозрачной среды, то образуется не один только отражённый луч. Из точки падения луча выходит ещё второй луч, распространяющийся во второй прозрачной среде, его называют преломлённым лучом. Направление преломлённого луча не совпадает с направлением падающего луча, однако между ними существует определённая связь, которую можно установить на опыте.

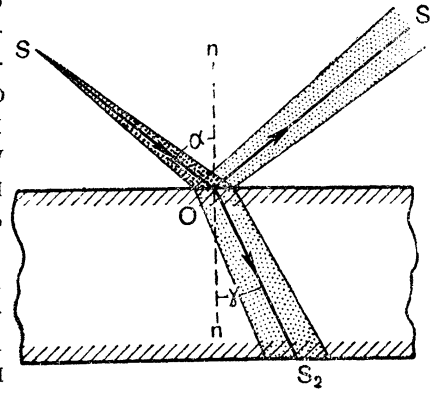


Рис. 271а. Преломление света при падении пучка на поверхность стекла.

На рисунке 271а пучок света падает на полированную поверхность стеклянной пластинки. На границе, разделяющей стекло и воздух, этот пучок раздваивается на два пучка; один из них отражается от поверхности стекла, другой же переходит в стекло, резко изменив своё направление. SO — осевой луч падающего пучка света; OS_1 — отражённого и OS_2 — преломлённого пучка.

Сравнив направление преломлённого луча с направлением перпендикуляра On, проведённого к границе в точке падения, мы увидим, что преломлённый луч OS_2 лежит по ту же сторону перпендикуляра, где находится и луч отражённый OS_1. Угол SOn — угол падения луча; обозначим его буквой α; угол S_2On между преломлённым лучом OS_2 и перпендикуляром On называется углом преломления; обозначим его буквой γ. При изменении угла падения меняется и угол преломления. Угол преломления равен нулю, когда угол падения равен нулю; с увеличением же угла падения увеличивается и угол преломления; однако всё время угол преломления остаётся меньше угла падения.

На рисунке 271б изображена установка для наблюдения явления преломления света при переходе из воздуха в воду и из воды в воздух.

Возьмём стеклянную пластинку, нижняя грань которой параллельна верхней и покрыта тонким слоем серебра (рис. 272). Пустим на пластинку луч света под углом α и проследим ход его из стекла в воздух. Мы заметим, что в этом случае угол преломления всегда больше угла падения. Упав на нижнюю грань под углом γ, луч отразится от неё и, встретив под этим углом верх-

нюю грань, выйдет в воздух под некоторым углом α_1. Измерив углы α_1 и α, можно убедиться, что они равны: $\alpha_1 = \alpha$. Если па-

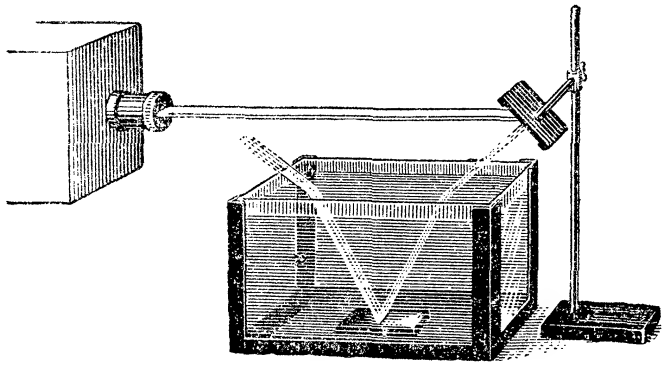


Рис. 271б. Установка для наблюдения явления преломления света при переходе из воздуха в воду и из воды в воздух.

дающий луч будет пущен по направлению преломлённого луча, то луч преломлённый пойдёт по линии луча падающего, т. е. *луч падающий и луч преломлённый взаимообратимы.*

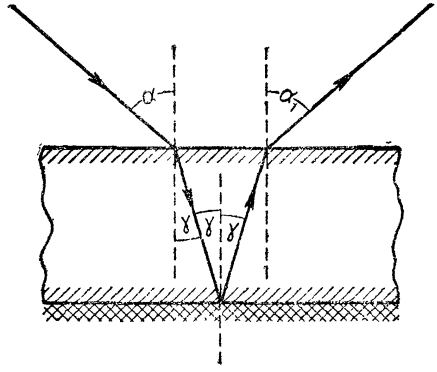


Рис. 272. Луч падающий и луч преломлённый взаимообратимы.

На основании опытов были установлены следующие законы преломления света:

1. Преломлённый луч лежит в той же плоскости, в которой лежат падающий луч и перпендикуляр, восставленный в точке падения луча к границе раздела двух сред.

2. При всех изменениях углов падения и преломления отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данных двух сред есть величина постоянная, называемая показателем преломления второй среды относительно первой.

Математически этот закон можно написать в виде следующей формулы:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n,$$

где α — угол падения, γ — угол преломления и n — показатель преломления.

Показатель преломления данного вещества по отношению к вакууму называется абсолютным показателем преломления этого вещества.

Практически показатель преломления определяется обычно относительно воздуха, а не относительно вакуума. Чтобы получить показатель преломления данного вещества относительно вакуума, надо значение показателя преломления этого вещества относительно воздуха умножить на абсолютный показатель преломления воздуха, равный 1,0003.

Величина показателя преломления для данного вещества зависит от цветности лучей света.

Несколько значений показателей преломления для красного света даны в нижеследующей таблице.

Вещество	Показатель преломления красного света относительно воздуха
Вода	1,33
Кварцевое стекло	1,46
Каменная соль	1,54
Стекло — лёгкий кронглас . .	1,51
Стекло — лёгкий флинтглас .	1,60
Стекло — тяжёлый флинтглас	1,74
Сероуглерод	1,62
Алмаз	2,40

При сравнении двух веществ то из них, которое имеет больший показатель преломления, называется оптически более плотным.

Понятие показателя преломления имеет глубокое физическое содержание. *Абсолютный показатель преломления (n) указывает, во сколько раз скорость света в вакууме (c) больше скорости света (v) в данном веществе, т. е.* $n = \frac{c}{v}$.

Этот важный вывод вытекает из волновой теории распространения света, основы которой будут изложены в главе IX.

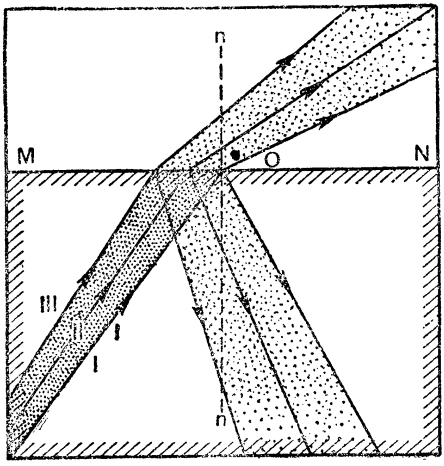
146. Полное отражение света. Рассмотрим подробнее случай перехода света из оптически более плотной среды в менее плотную.

Пусть на границу MN стекло — воздух из стекла падает расходящийся пучок света. Определим его тремя лучами — двумя крайними I и III и осевым II (рис. 273, *а*). У границы часть пучка отразится в стекло, часть перейдёт в воздух. Будем постепенно увеличивать угол падения. Мы заметим, что по мере возрастания угла падения яркость отражённого пучка будет возрастать, а преломлённого уменьшаться. При некотором угле падения γ_0 луч I

будет скользить по поверхности раздела (рис. 273, *б*). При увеличении угла падения то же произойдёт и с осевым лучом *II* и, наконец, с лучом *III*. При дальнейшем увеличении угла падения луча *III* преломлённого пучка уже не будет, весь падающий пучок отразится в стекло (рис. 273, *в*). Такое явление называется полным отражением.

Наименьший угол падения, при котором наступает полное отражение, называется предельным углом полного отражения.

Таким образом, полное отражение наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную в том случае, если все лучи заданного пучка падают под углом, большим предельного.



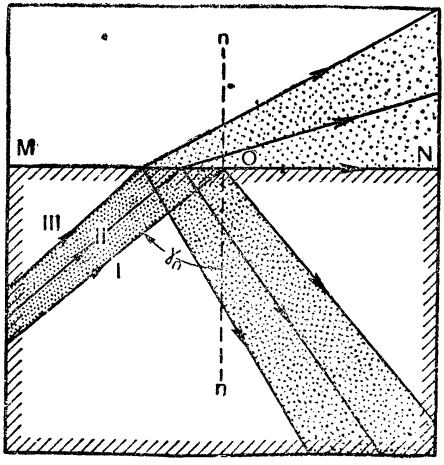
а

Предельному углу падения γ_0 соответствует угол преломления, равный 90°. Пусть показатель преломления стекла относительно воздуха — n; тогда на основании закона преломления света и свойства обратимости луча можно написать:

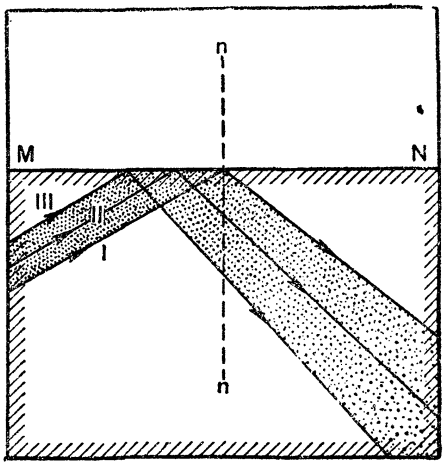
$$\frac{\sin \gamma_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n};$$

отсюда

$$\sin \gamma_0 = \frac{1}{n}.$$



б



в

Рис. 273. а) расходящийся пучок лучей света выходит из стекла в воздух; б) луч *I* скользит по поверхности раздела стекло — воздух; в) весь падающий пучок лучей света отражается в стекло.

Из полученного соотношения вычисляется предельный угол полного отражения. Для воды ($n=1{,}33$) этот угол равен 48°,5, для стекла ($n=1{,}51$) 42°, а для алмаза ($n=2{,}4$) предельный угол равен 24°,5.

Полное отражение широко используется в различных оптических приборах, например в полевых биноклях, перископах и т. д.

Полным отражением объясняется целый ряд явлений, например блеск капель росы при солнечном свете, светящиеся фонтаны, блеск («игра») бриллиантов, образование миражей и т. д.

147. Изменение светового потока при отражении и преломлении. Допустим, что свет, падающий на границу раздела двух сред, не поглощается второй средой. Часть светового потока Φ_0 отражается от поверхности раздела сред, другая же часть Φ_n проникает во вторую среду и распространяется в ней. При таких условиях

$$\Phi=\Phi_0+\Phi_n.$$

Из этого равенства следует, что как отражённая, так и преломлённая части потока света в отдельности не равны падающему потоку света; это легко можно заметить и в наших опытах (рис. 273). Кроме того, опыт показывает, что при малых углах падения преломлённый поток света значительно больше отражённого. По мере же увеличения угла падения увеличивается и отражённый поток, между тем как преломлённый поток уменьшается.

Кроме того, отражённый поток света зависит от оптических свойств тех двух сред, граница между которыми отражает свет. Оказывается, чем больше разница между показателями преломления обеих сред, тем больший поток отражается. Если показатели преломления обеих сред одинаковы, то свет вообще не отражается.

Так, например, показатель преломления кедрового масла весьма близок к показателю преломления стекла; поэтому стеклянная палочка, погружённая в кедровое масло, невидима (несветящиеся тела мы видим благодаря отражённому свету). Этим свойством веществ пользуются для склеивания стёкол в оптических приборах, подбирая такие склеивающие вещества, показатель преломления которых близок к показателю преломления стекла.

148. Прохождение света через прозрачную пластинку с параллельными гранями. Практически большое значение имеет случай, когда свет переходит из одной среды в другую и затем снова выходит в первую, т. е. свет проходит через какое-либо оптически прозрачное тело. Поверхности раздела могут быть при этом самыми разнообразными. Мы прежде всего разберём случай, когда свет проходит через пластинку, ограниченную параллельными плоскостями.

Пусть AA_1BB_1 — плоско-параллельная пластинка (рис. 274). Легко показать, что луч SO пучка света, падающего на пластинку,

после двух преломлений выйдет наружу по направлению O_1S_1, параллельному SO.

Обозначим угол падения луча SO через α, а угол преломления через γ. Вследствие параллельности плоскостей AA_1 и BB_1 луч, пройдя стекло, встретит плоскость пластинки под углом $\gamma_1=\gamma$ и, следовательно, выйдет из неё под углом $\alpha_1=\alpha$. Таким образом, при прохождении через плоско-параллельную пластинку луч света не изменяет своего направления, он только смещается. Чем толще пластинка, тем значительнее будет это смещение. Если рассматривать предмет через плоско-параллельное стекло, то он будет казаться нам сдвинутым относительно своего истинного положения.

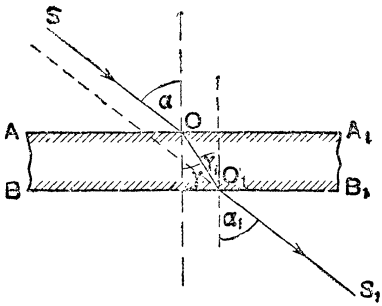


Рис. 274. Преломление в плоско-параллельной пластинке.

Упражнение 18.

Две толстые стеклянные пластинки, расположенные параллельно друг другу, разделены воздушным слоем. Начертить ход луча света через эту систему.

149. Прохождение света через прозрачную треугольную призму. На рисунке 275а AB и AC — плоские поверхности призмы, ограничивающие её преломляющий угол φ. Плоскость чертежа

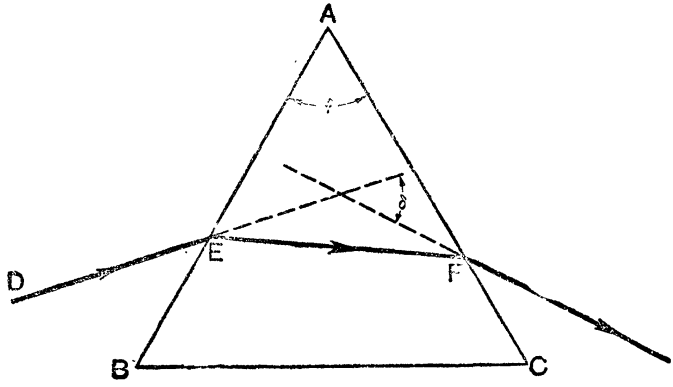


Рис. 275а. Преломление в призме.

перпендикулярна к обеим преломляющим поверхностям призмы и представляет собой сечение призмы. Пусть на грань AB этой призмы падает какой-нибудь одноцветный, например красный, пучок лучей света (на рис. 275а показан только осевой луч DE этого пучка). В точке E луч DE преломится и пойдёт внутри призмы по направлению EF. У грани AC этот луч ещё раз преломится, отклоняясь к грани BC. Вышедший из призмы луч света

после двукратного преломления отклонится на угол δ. Величина угла отклонения δ зависит от преломляющего угла призмы φ и показателя преломления вещества призмы n. Если рассматривать какой-либо предмет через треугольную призму, то предмет покажется смещённым к вершине угла, образованного плоскостями, через которые проходят лучи от источника (рис. 275б).

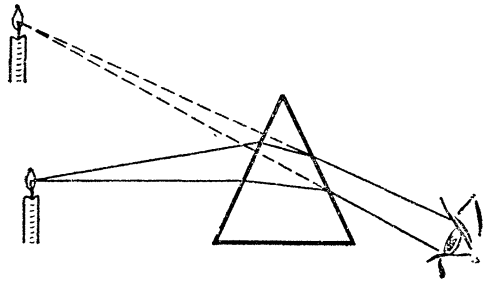


Рис. 275б. Изображение свечи рассматривается через треугольную призму.

Если пропускать пучок лучей на одну из граней стеклянной равнобедренной прямоугольной призмы ABC (рис. 276), то внутри призмы лучи отразятся от грани призмы AC, испытав полное отражение, так как в этом случае угол падения лучей на грань AC больше 42°, т. е. больше предельного угла для стекла. Прямоугольная призма ABC в положениях, показанных на рисунке, может быть использована для поворота светового пучка на 90° и для обращения какого-либо изображения, получающегося в оптическом приборе. В последнем случае нижние лучи, отразившись внутри призмы от грани AC, по выходе из призмы становятся верхними, а верхние — нижними. Такая призма называется о б о р о т н о й и применяется во многих оптических приборах, в частности в призматическом бинокле.

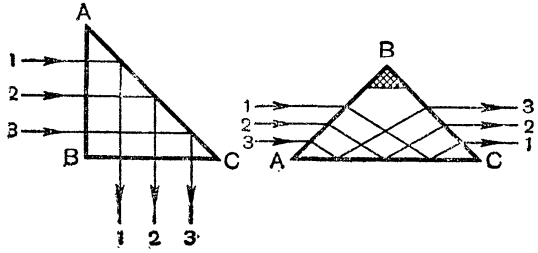


Рис. 276. Поворотная (слева) и оборотная (справа) призмы.

Упражнение 19.

1. В воде находится полая стеклянная призма, заполненная воздухом. Начертите ход луча, падающего на одну из преломляющих граней такой призмы. Можно ли сказать, что такая призма дважды отклоняет к основанию проходящий через неё луч света?

2. Показатель преломления воды 1,33, скипидара 1,51. Найти показатель преломления скипидара относительно воды.

3. Определить, во сколько раз кажущаяся глубина озера меньше действительной, если смотреть вертикально вниз с лодки.

У к а з а н и е. Построить два симметричных относительно нормали луча, выходящих из точки на дне озера под малым углом падения, и определить положение точки кажущегося пересечения преломлённых лучей. Вследствие малых углов синусы углов приравнять тангенсам этих углов.

Зависит ли кажущееся уменьшение глубины водоёма от угла, под которым мы смотрим на его поверхность?

4. Определить скорость света в алмазе, показатель преломления которого 2,4.

5. Начертить ход луча при переходе его из стекла в воздух, если угол падения составляет 45°, а показатель преломления стекла 1,72.

6. Найти предельный угол полного отражения для каменной соли ($n=1{,}54$).

7. Определить смещение луча при прохождении через плоско-параллельную стеклянную пластинку толщиной $d=3$ *см*, если луч падает под углом 60°. Показатель преломления стекла $n=1{,}51$.

8. Найти положение изображения объекта, расположенного на расстоянии 4 *см* от передней поверхности плоско-параллельной пластинки толщиной 1 *см*, посеребрённой с задней стороны, считая, что показатель преломления вещества пластинки равен 1,51.

150. Линзы. Прозрачные для света тела, ограниченные с двух сторон сферическими или иными кривыми поверхностями (одна из двух поверхностей может быть плоской), называются оптическими стёклами или линзами.

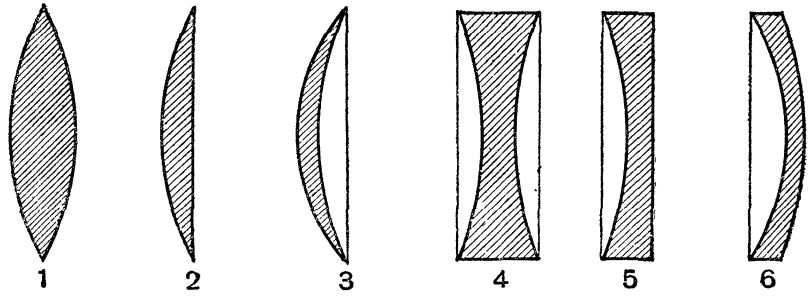


Рис. 277. Поперечный разрез линз: *1, 2, 3* — собирающие линзы; *4, 5, 6* — рассеивающие линзы.

По форме ограничивающих поверхностей линзы могут быть сферическими, цилиндрическими и другими (в дальнейшем будут рассматриваться только сферические линзы).

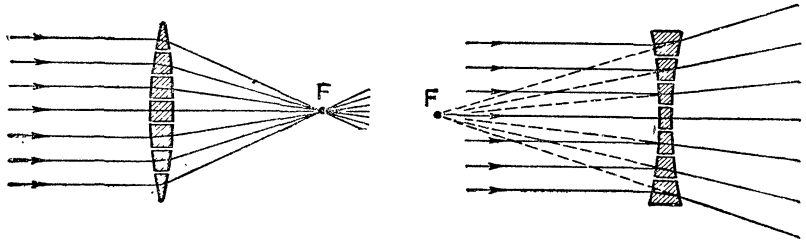


Рис. 278. Преломляя лучи, линза действует как совокупность призм.

Линзы, у которых середина толще, чем края, называются выпуклыми; те же линзы, у которых края толще середины, называются вогнутыми.

На рисунке 277 изображены в поперечном разрезе различные виды сферических линз: *1, 2, 3* — выпуклые линзы; *4, 5, 6* — вогнутые линзы.

Пустим параллельный пучок лучей света на выпуклую линзу, а за линзой поместим экран. Перемещая экран относительно линзы, мы получим на нём небольшое светлое пятно. Выпуклая линза, преломляя падающие на неё лучи, собирает их. Поэтому такая линза называется собирающей. Вогнутая же линза, преломляя свет, рассеивает его в стороны. Такая линза называется рассеивающей.

Рисунок 278 поясняет действие собирающих и рассеивающих линз. Собирающую линзу можно представить в виде совокупности большого числа призм, расширяющихся к середине линзы, а рассеивающую — как совокупность большого числа призм, расширяющихся к краям.

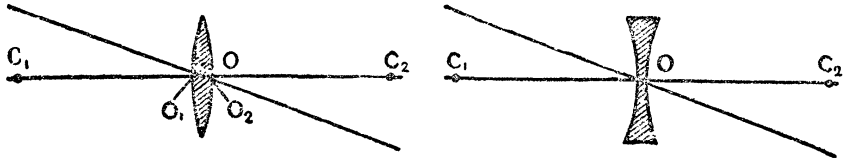


Рис. 279. Оптическая ось линзы и оптический центр линзы.

Известно, что каждая призма отклоняет лучи света к грани, лежащей против преломляющего угла; величина отклонения зависит от величины отклоняющего угла. Понятно, что линзы с утолщением на середине отклоняют лучи к середине, собирая их, линзы же с утолщением по краям отклоняют лучи к краям, т. е.

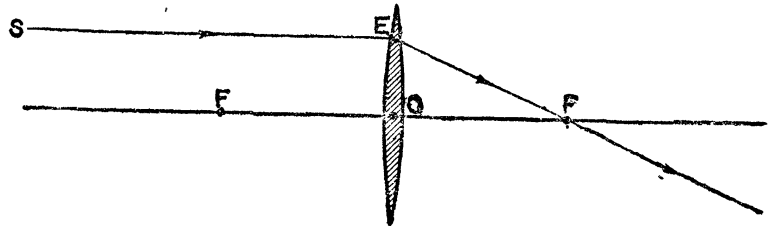


Рис. 280. Центральный луч, параллельный главной оптической оси линзы, после преломления проходит через фокус F.

рассеивают их. Середина линзы действует как плоско-параллельная пластинка.

Мы будем рассматривать только очень тонкие линзы, в которых расстояние между краями O_1O_2 очень мало по сравнению с расстояниями O_1C_1 или O_2C_2 (рис. 279). В таких линзах практически точки O_1 и O_2 можно считать сливающимися в одной точке O. Эту точку O называют оптическим центром линзы.

Всякая прямая, проходящая через оптический центр, называется оптической осью линзы. Оптическая ось, проходящая

через центры сферических преломляющих поверхностей C_1 и C_2, образующих линзу, называется главной оптической осью линзы (рис. 279), другие — побочными осями.

Луч света, идущий по какой-либо из оптических осей, проходит тонкую линзу, не меняя своего направления.

151. Фокус линзы. Если направить на собирающую линзу осевой луч SE, параллельный её оси (рис. 280), то, пройдя линзу, этот луч пересечёт ось на определённом расстоянии от линзы —

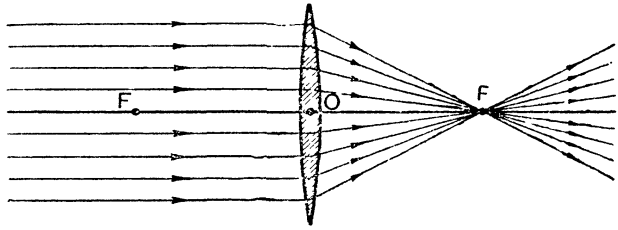


Рис. 281. Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в линзе сходятся в фокусе.

в точке F. Расстояние OF называется фокусным расстоянием линзы, а самая точка F называется фокусом линзы. У всякой линзы два фокуса, по обе стороны её.

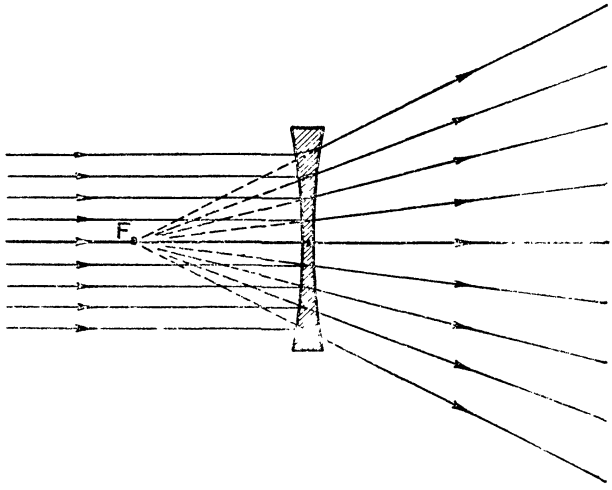


Рис. 282. Мнимый фокус двояковогнутой линзы.

Основываясь на законах преломления света, можно теоретически доказать, что все осевые лучи, т. е. лучи, идущие вблизи главной оптической оси, падающие на тонкую собирающую линзу параллельно её оси, сходятся в фокусе. Опыт подтверждает это теоретическое доказательство (рис. 281).

Пустив пучок осевых лучей параллельно главной оптической оси на тонкую двояковогнутую линзу (рис. 282), мы заметим, что из линзы лучи выйдут расходящимся пучком. Если такой расходящийся пучок попадёт в наш глаз, то нам будет казаться, что лучи выходят из одной точки *F*. Эта точка называется мнимым фокусом двояковогнутой линзы.

Плоскость *MN*, проведённая через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси, называется фокальной плоскостью линзы (рис. 283). Фокальных плоскостей у линзы две, и расположены они по обе стороны линзы.

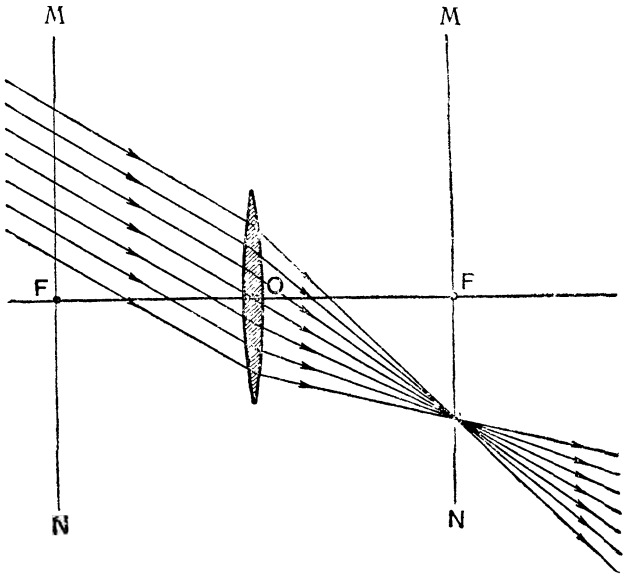


Рис. 283. Лучи, параллельные побочной оптической оси, после преломления в линзе сходятся в точке, лежащей на фокальной плоскости.

Когда на линзу падает пучок лучей, параллельных какой-либо побочной оптической оси, то после преломления в линзе он сходится на соответствующей побочной оптической оси в месте её пересечения с фокальной плоскостью (рис. 283).

152. **Оптическая сила линзы.** ***Величина, обратная фокусному расстоянию линзы F, называется оптической силой D линзы:***

$$\frac{1}{F}=D.$$

За единицу оптической силы линзы принимается оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 *м; такая единица называется диоптрией.*

У выпуклых линз оптическая сила положительна, у вогнутых — отрицательна.

Пример. Чему равна оптическая сила очковой выпуклой линзы, фокусное расстояние которой $F=50$ *см*?

$$D=\frac{1}{F};\quad F=0{,}5\ м;\quad D=\frac{1}{0{,}5}=2 \text{ диоптриям.}$$

Величина фокусного расстояния линзы, а следовательно, и её оптическая сила определяются показателем преломления вещества линзы и радиусами сферических поверхностей, её ограничивающих.

Теория даёт формулу, по которой можно рассчитать оптическую силу линзы:

$$\frac{1}{F}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right).$$

В этой формуле n — показатель преломления вещества линзы, R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы. Радиусы выпуклых поверхностей считаются положительными, вогнутых — отрицательными.

153. Изображение точки в собирающей линзе. Теория показывает и опыт подтверждает, что осевые лучи, вышедшие из одной светящейся точки, после прохождения через линзу сходятся также в одной точке, которая называется изображением первой точки.

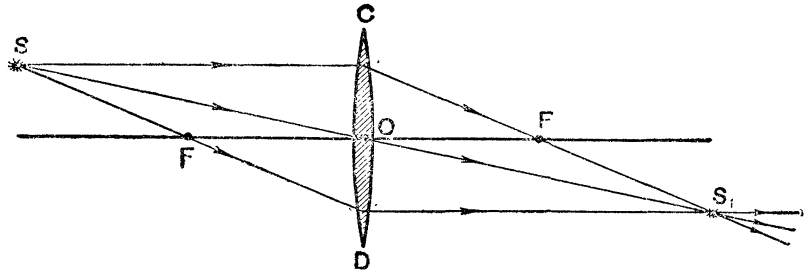


Рис. 284а. Построение изображения точки в собирающей линзе.

Этим важным положением можно воспользоваться для нахождения изображения светящейся точки в собирающей линзе путём геометрического построения хода центральных (осевых) лучей.

Так как все центральные лучи, выходящие из одной точки, пройдя через собирающую линзу, сходятся в одной точке, то для построения изображения её достаточно найти точку пересечения каких-либо двух лучей.

Построим, например, изображение светящейся точки (рис. 284а). Проще всего это можно выполнить при помощи лучей, указанных на этом рисунке. Один из них — луч SC, параллельный главной оптической оси, преломившись в линзе, пройдёт через фокус линзы F; другой луч SD, идущий из точки S через фокус F, за линзой пойдёт параллельно оси линзы. Третий луч SO пройдёт через оптический центр линзы, не преломляясь. Ход всякого иного луча, выходящего из точки S, нужно было бы

строить, применяя законы преломления света, что значительно сложнее. Но в этом нет никакой необходимости, так как все центральные (осевые) лучи, выходящие из точки S, преломившись в линзе, обязательно пройдут через точку S_1.

Построим изображение точки S, лежащей на оптической оси линзы (рис. 284б). Для этого проведём из точки S на линзу какой-нибудь луч. Параллельно этому лучу проведём побочную оптическую ось BC, которая пересечёт фокальную плоскость MN в точке C. После преломления в линзе через точку C пройдёт весь

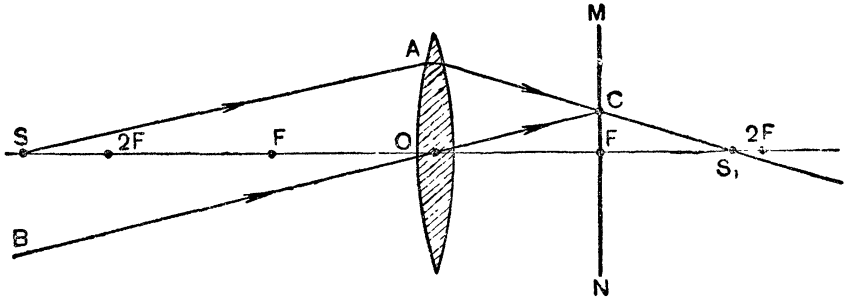


Рис. 284б. Построение изображения точки S, лежащей на главной оптической оси.

пучок света, параллельный побочной оптической оси BC; следовательно, через эту точку пройдёт и луч SA. Главную оптическую ось этот луч пересечёт в точке S_1, которая и является изображением точки S. Второй луч из S направлен вдоль главной оптической оси.

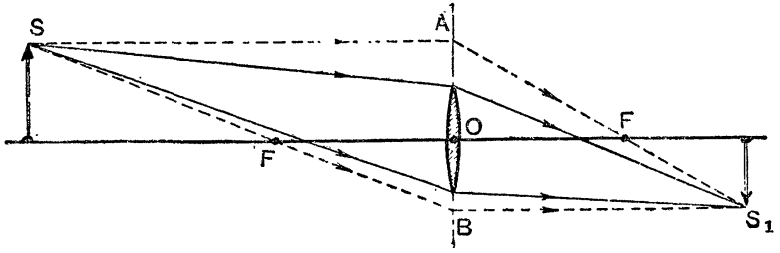


Рис. 285. Построение изображения в линзе в случае, когда предмет значительно больше линзы.

Выбранные нами лучи для построения изображения точки не обязательно должны пройти через линзу.

Так, например, на рисунке 285 лучи SA и SB не проходят через линзу, но могут быть использованы для построения изображения точки, которое, очевидно, определится пучком реальных лучей, вышедших из точки S и ограниченных размерами линзы. Этот реальный пучок, преломившись в линзе, пройдёт через точку S_1.

154. Изображение предметов в собирающей линзе. Рассматривая предмет как совокупность точек и пользуясь свойством

центральных лучей, выходящих из точки после преломления в линзе, собираться также в точке, можно геометрически построить изображение предмета в линзе.

Построим, например, изображение предмета AB в собирающей линзе (рис. 286). Для этого достаточно построить изображение двух его крайних точек A и B. При построении же изображения, например точки A, проще всего провести из этой точки два луча: один параллельно главной оптической оси линзы, другой через оптический центр линзы, т. е. по побочной оптической оси AA_1.

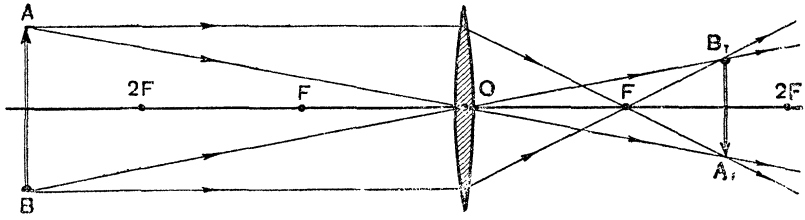


Рис. 286. Построение изображения предмета в линзе в случае, когда предмет находится за двойным фокусным расстоянием.

После прохождения линзы оба луча пересекутся в точке A_1. Таким же способом строим изображение B_1 точки B. Изображения остальных точек предмета расположатся между точками A_1 и B_1. Таким образом, A_1B_1 является изображением предмета AB. Изображение A_1B_1 — действительное, обратное и уменьшённое.

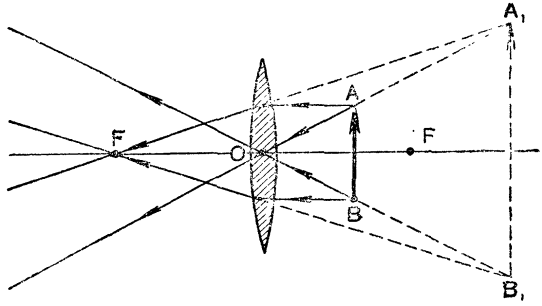


Рис. 287. Построение изображения в линзе в случае, когда предмет находится между фокусом и линзой.

На рисунке 287 показано построение изображения предмета, расположенного относительно линзы на расстоянии, меньшем фокусного расстояния. В этом случае изображение получается мнимое.

Характер получаемого от линзы изображения предмета, т. е. его величина и положение, зависит от положения предмета относительно линзы. Местонахождение изображения предмета и его величина могут быть найдены с помощью формулы линзы.

На рисунке 288 показана установка для получения изображения с помощью линзы.

155. Формула линзы. Для вывода формулы линзы воспользуемся рисунком 289. Здесь AB — предмет, A_1B_1 — его изображение. Исходя из подобия прямоугольных треугольников FOC и FA_1B_1, можно написать:

$$\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FB_1}. \qquad (1)$$

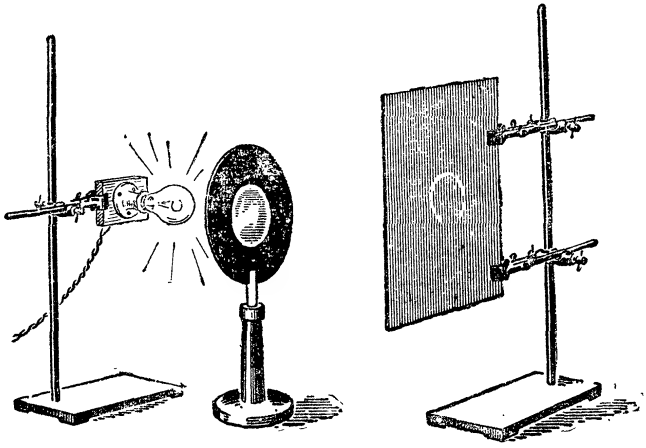


Рис. 288. Установка для получения изображения в линзе.

Из подобия треугольников ABO и A_1B_1O имеем:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{B_1O}. \qquad (2)$$

Так как $AB=OC$, то левые части равенств (1) и (2) равны между собой. Приравнивая правые части этих равенств, мы получим:

$$\frac{FO}{FB_1} = \frac{BO}{B_1O},$$

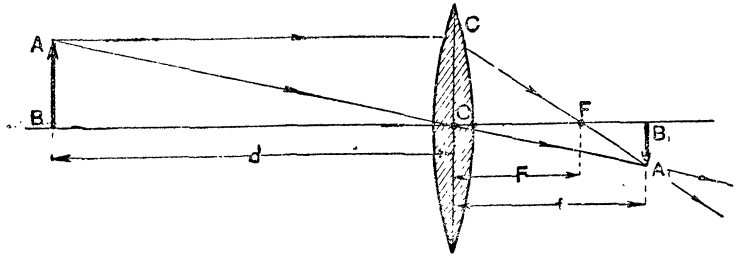


Рис. 289. К выводу формулы линзы.

или, заменяя $FO=F$, $FB_1=f-F$, где $f=B_1O$ — расстояние изображения от линзы, $BO=d$ — расстояние предмета от линзы, получим:

$$\frac{F}{f-F}=\frac{d}{f},$$

откуда

$$fF=df-dF,$$

или

$$fF+dF=df.$$

Разделив обе части последнего равенства на dfF, получим формулы линзы:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}.$$

Отсчёт расстояний d, f и F производится от оптического центра линзы. Величины d и F, входящие в формулу выпуклой линзы, всегда положительные, величина же f в случае мнимых изображений отрицательна; она откладывается по ту же сторону от центра линзы, что и величина d.

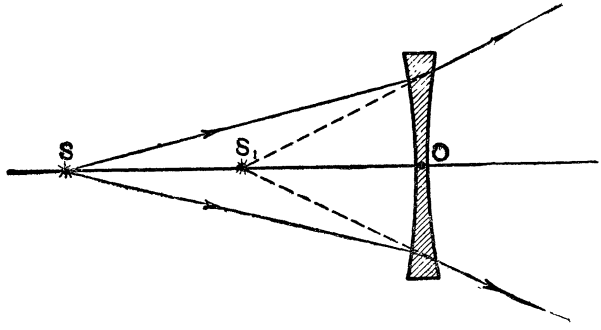


Рис. 290. Изображение точки S в двояковогнутой линзе.

Отношение линейного размера изображения A_1B_1 к размеру предмета AB называется линейным увеличением линзы.

Обозначая линейное увеличение буквой k, получаем:

$$k=\frac{A_1B_1}{AB}.$$

Так как $\frac{A_1B_1}{AB}=\frac{f}{d}$, то из этого следует, что линейное увеличение линзы

$$k=\frac{f}{d}.$$

156. Двояковогнутая линза. Построим изображение точки, даваемое двояковогнутой линзой. Лучи от светящейся точки S

после прохождения линзы идут расходящимся пучком (рис. 290), но нам будет казаться, что эти лучи выходят из одной точки, находящейся перед линзой, из точки S_1, которая и является мнимым изображением точки S.

Проделав опыт с двояковогнутой линзой, легко убедиться, что изображения предметов в ней всегда мнимые, уменьшённые и прямые, независимо от того, на каком расстоянии от линзы находится предмет.

Это же можно показать и графически (рис. 291).

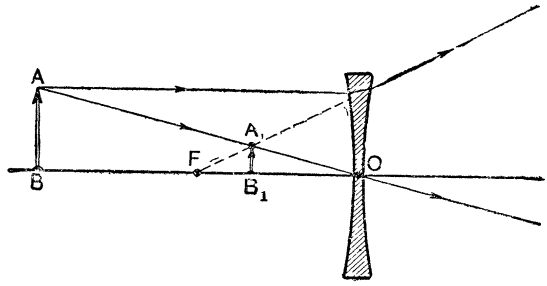


Рис. 291. Изображение предмета в двояковогнутой линзе.

Упражнение 20.

1. В воде находится полая стеклянная двояковыпуклая линза, заполненная воздухом. На линзу падает параллельный пучок лучей света. Каков будет этот пучок после прохождения линзы? Сделайте чертёж.

Какие изображения будет давать в воде такая линза? Всегда ли двояковыпуклая линза является собирающей линзой?

2. Разберите аналогичную задачу для полой двояковыпуклой линзы, заполненной воздухом и находящейся в воде. Если в школьном физическом кабинете имеются часовые стёкла, изготовьте из них описанные выше линзы и проделайте с ними опыты.

3. Пользуясь формулой собирающей линзы: $\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$, рассчитайте положение и определите характер изображений предметов, различно удалённых от линзы, для случаев, указанных в таблице.

Для случаев $d<2F$ и $d<F$ постройте изображения графически и результаты сверьте с данными таблицы.

№ п/п.	d	f	Какое изображение: действительное или мнимое, уменьшённое или увеличенное, где оно находится относительно линзы
1	$d\to\infty$		
2	$d>2F$		
3	$d=2F$		
4	$2F>d>F$		
5	$d=F$		
6	$d<F$		

4. Напишите формулу рассеивающей линзы, принимая во внимание, что расстояние от оптического центра линзы до мнимого изображения точки берётся со знаком минус.

5. Определить оптическую силу линз, фокусное расстояние которых 10 *см*; —10 *см*.

6. На каком расстоянии от линзы с фокусным расстоянием $F=10$ *см* получится изображение предмета, помещённого на расстоянии 50 *см* от линзы?

7. Изображение предмета, помещённого на расстоянии 40 *см* от двояковыпуклой линзы, получилось на расстоянии 15 *см* от линзы. Определить фокусное расстояние линзы и величину изображения, если величина самого предмета 60 *см*.

8. На снимке, сделанном камерой с фотообъективом, фокусное расстояние которого 13,5 *см*, при длине камеры 15 *см*, получилось изображение предмета величиной 2 *см*. Какова действительная величина предмета?

9. Расстояние между лампочкой накаливания и экраном равно $L=150$ *см*. Между ними помещается собирающая линза, которая даёт на экране резкое изображение нитей лампочки при двух положениях линзы. Каково фокусное расстояние линзы, если расстояние между указанными положениями линзы $l=30$ *см*?

ГЛАВА VIII

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ. ЗРЕНИЕ

157. Фотографический аппарат. Основными частями фотоаппарата являются камера и объектив. Камера состоит из непрозрачного для света ящика (рис. 292а), задняя стенка которого (служащая экраном) закрыта матовым стеклом. В переднюю стенку камеры вставляется о б ъ е к т и в *Об*, представляющий собой систему линз (в простейшем случае — одну собирающую линзу). Для получения чёткого изображения предмета, который

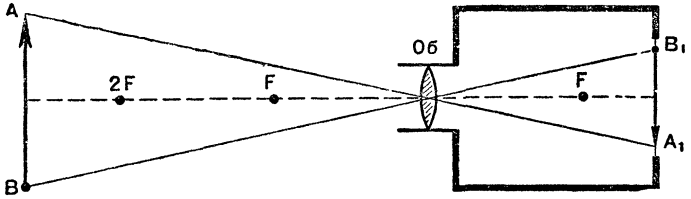


Рис. 292а. Схема фотокамеры с объективом.

может находиться на разных расстояниях от фотоаппарата, камеру делают иногда раздвижной (в форме гармоники). Благодаря этому матовое стекло или объектив можно передвигать. На матовом стекле камеры получается действительное и обратное изображение A_1B_1 предмета AB, который можно сфотографировать, заменив стекло пластинкой или плёнкой, покрытой тонким слоем фотоэмульсии. Последняя, являясь чувствительной к свету, в разных своих местах темнеет сильнее или слабее в зависимости от величины световых потоков, падающих на неё от различных точек предмета. Полученный снимок затем обрабатывается (проявляется, фиксируется и промывается водой) специальными составами (реактивами) для того, чтобы сделать его нечувствительным к свету.

При фотографировании имеет большое значение количество световой энергии, падающей на пластинку, а так как количество этой энергии прямо пропорционально времени освещения пластинки, то большое значение имеет время экспозиции. Время экспозиции зависит от освещённости и чувствительности фотогра-

фической пластинки. Но, кроме того, количество попадающей на пластинку энергии зависит от качества объектива.

Освещённость фотографической пластинки зависит от поступающего в камеру светового потока и расстояния пластинки от объектива. Поступающий в камеру световой поток ограничен площадью отверстия объектива и при заданном расстоянии предмета от объектива пропорционален этой площади, т. е. пропорционален квадрату диаметра отверстия (d^2). При достаточной удалённости предмета фотографическая пластинка располагается близко к фокальной плоскости объектива; следовательно, она удалена на расстояние F от объектива. Освещённость же обратно пропорциональна квадрату этого расстояния. Таким образом, освещённость пластинки пропорциональна d^2 и обратно пропорциональна F^2. Величина $\frac{d^2}{F^2}$ называется **светосилой объектива**. В практике для оценки объектива применяют величину $\frac{d}{F}$, называемую **относительным отверстием**. На оправах объективов обозначено фокусное расстояние объектива F и относительное отверстие, которое задаётся в виде отношения 1 к частному от деления F на d.

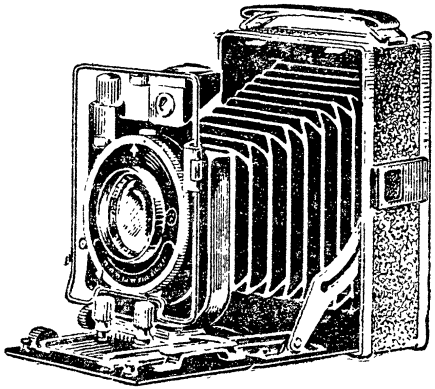


Рис. 292б. Внешний вид фотоаппарата.

Если, например, на оправе написано 1 : 4,5, то это обозначает, что фокусное расстояние объектива в 4,5 раза больше диаметра отверстия объектива.

На рисунке 292б изображён внешний вид фотоаппарата.

158. Проекционные аппараты. Назначение проекционного аппарата — давать на экране увеличенное изображение светящегося или освещённого предмета.

На рисунке 293 показана схема устройства проекционного фонаря для проецирования рисунков на стекле (диапозитивов). Главной оптической частью проекционного фонаря является **объектив** *Об*, представляющий собой систему линз, действующую как одна собирающая линза. Назначение объектива — давать на экране MN сильно увеличенное изображение диапозитива D. Для этого диапозитив располагается около фокальной плоскости объектива, могущего перемещаться для резкой наводки «на фокус».

Чтобы направить в объектив весь свет, идущий от диапозитива, размеры которого обычно велики в сравнении с размерами объектива, применяется **конденсор** K. Конденсор представля-

ет собой короткофокусную систему линз значительного размера. Располагается конденсор так, чтобы свет от него сходился в середине объектива.

В качестве источников света в фонаре применяют электрические дуговые лампы или специальные проекционные лампы накаливания в 300, 500 и 1000 *вт*.

Практически линейное увеличение проекционного фонаря равно $\frac{f}{F}$, где f — расстояние от объектива до изображения (т. е. до экрана); F — фокусное расстояние объектива. Поэтому для большего увеличения необходимо экран помещать дальше от фонаря или применять более короткофокусный объектив. Однако при этом надо иметь в виду, что с увеличением изображения уменьшается яркость его.

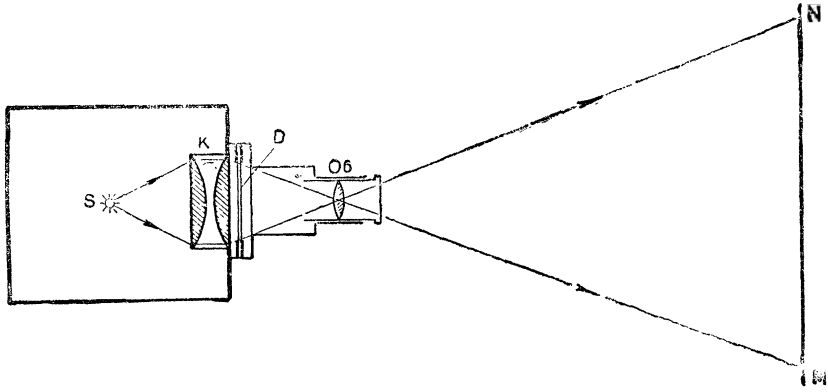


Рис. 293. Схема устройства проекционного фонаря.

Для проецирования на экран непрозрачных предметов, например чертежей на бумаге или рисунков из книг, широко применяются особой конструкции проекционные фонари — эпископы. В этих приборах проецируемый предмет (рисунок или чертёж) сильно освещается сбоку при помощи ламп и зеркал и объективом проецируется на экран. В настоящее время широкое распространение получили проекционные приборы, в которых скомбинировано устройство для проецирования прозрачных (диа) и непрозрачных (эпи) объектов. Приборы этого вида называются эпидиаскопами. На рисунке 294 показана схема эпидиаскопа. На рисунке 294, *а* изображена установка для проецирования диапозитива — работает нижний объектив. Внизу на рисунке 294, *б* показана установка для проецирования непрозрачной картины — работает верхний объектив.

159. Глаз. На рисунке 295 представлен разрез человеческого глаза. Внешняя оболочка глазного яблока называется склеротикой *SS*, передняя прозрачная часть которой *CC* носит название роговой оболочки. Внутренняя сторона склеро-

тики покрыта сосудистой оболочкой, состоящей из кровеносных сосудов. В передней части сосудистая оболочка переходит в радужную оболочку *ii*, посередине которой находится круглое отверстие — зрачок *p*.

Внутри глаза на сосудистой оболочке находится сетчатая оболочка *rr*, представляющая собой разветвление зрительного нерва с нервными окончаниями в виде палочек и колбочек.

Во внутренней полости глаза, сзади радужной оболочки, находится прозрачное хрящевидное тело *L* — хрусталик. Хрусталик с помощью особых мускулов может изменять свою кривизну.

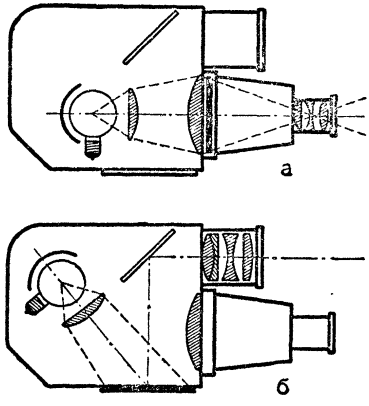


Рис. 294. Эпидиаскоп: *а* — работает нижний объектив; *б* — работает верхний объектив.

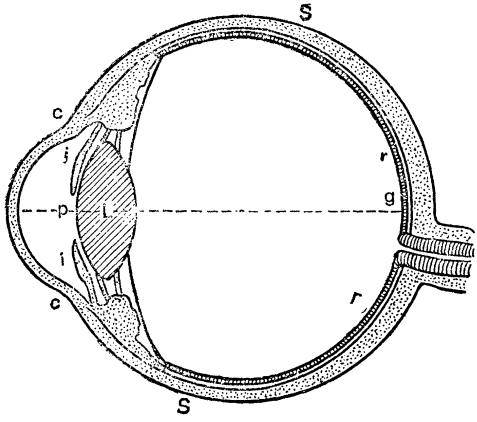


Рис. 295. Разрез глаза.

Против хрусталика на сетчатке находится жёлтое пятно *g*, обладающее наибольшей чувствительностью к свету.

При помощи мышц глаз устанавливается так, что изображение предмета попадает на жёлтое пятно.

Пространство между роговой оболочкой и хрусталиком наполнено бесцветной жидкостью — водянистой влагой. Остальную часть глаза между хрусталиком и сетчаткой заполняет студнеобразное стекловидное тело. Показатель преломления этих двух сред примерно 1,33, показатель преломления хрусталика около 1,5. Преломляющая система глаза в целом может быть рассматриваема как двояковыпуклая линза со средним фокусным расстоянием 1,5 *см*.

160. Зрение. Лучи света, попадающие в глаз от освещённого предмета, дают на сетчатке действительное, уменьшённое и обратное изображение. Это изображение производит соответствующее раздражение в окончаниях зрительного нерва, в результате чего мы видим предмет.

Хотя расстояние предмета от глаза может меняться, тем не менее изображение его на сетчатке остаётся отчётливым. Дости-

гается это тем, что хрусталик может изменять свою кривизну, а вместе с тем и свою оптическую силу. Когда мы рассматриваем более близкий предмет, то мышцы глаза делают хрусталик более выпуклым и он сильнее преломляет проходящие через него лучи. При рассматривании же отдалённых предметов хрусталик делается более плоским и менее преломляющим. Это свойство глаза приспособляться к расстоянию, на котором находятся рассматриваемые предметы, называется аккомодацией. Однако аккомодация глаза имеет предел, и мы очень близкие предметы видеть отчётливо не можем, так как резкого изображения этих предметов на сетчатке глаза не получается.

Пусть O (рис. 296) — оптический центр глаза. Построим на сетчатке изображение AB_2 предмета ab_2. Угол α называется углом зрения. При удалении предмета от глаза его изображение благодаря аккомодации глаза остаётся на сетчатке, но уменьшается ($AB_1 < AB_2$). Также будет меньше и угол зрения β. Если удалить предмет на очень большое расстояние, то угол зрения, под которым он рассматривается, будет очень мал, точки A и B так сблизятся, что мы уже не будем в состоянии различать их.

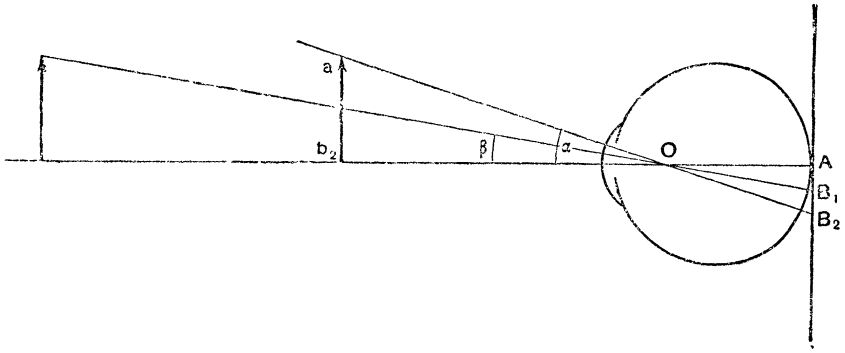


Рис. 296. Схема получения изображения предмета на сетчатке.

Если изображение на сетчатке столь мало, что оно укладывается только на одном нервном окончании, то глаз воспринимает это изображение как точку. Чтобы две точки воспринимались глазом как две точки и не сливались в одну, расстояние между их изображениями на сетчатке должно захватить не меньше двух нервных окончаний, а для этого угол зрения, под которым глаз видит эти точки, должен быть, как показывает опыт, не менее минуты.

Чем больше угол зрения, тем большее число нервных окончаний захватывает изображение предмета, тем отчётливее он виден. ***Расстояние, наиболее благоприятное для рассматривания предмета, называется расстоянием наилучшего зрения. Для нормального глаза оно приблизительно равно 25 см.***

161. Дефекты зрения. Очки. Фокус нормального ненапряжённого глаза лежит на сетчатке. Но существуют глаза, фокус у которых при тех же условиях лежит перед сетчаткой или за ней. В первом случае глаз называется *близоруким*, во втором — *дальнозорким*.

У близорукого глаза оптическая сила больше, чем у нормального.

Лучи света, идущие от какого-нибудь отдалённого предмета, в близоруком глазу сходятся не на сетчатке, а ближе неё, в точ-

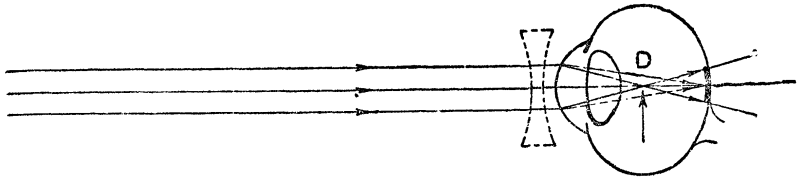


Рис. 297а. Близорукий глаз. Сплошными линиями показан ход лучей, когда очков нет, пунктирными линиями — при очках.

ке *D* (рис. 297а); поэтому близорукие люди смутно видят отдалённые предметы. Близорукость может быть исправлена ношением вогнутых очков.

Оптическая сила дальнозоркого глаза меньше нормального, вследствие чего лучи, идущие от сравнительно близких предме-

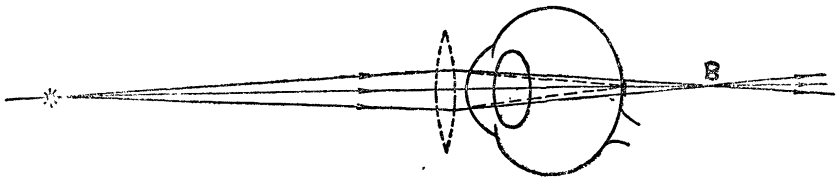


Рис. 297б. Дальнозоркий глаз.

тов, сходятся за сетчаткой в точке *B* (рис. 297б). Исправить этот недостаток можно ношением выпуклых очков.

162. Зрение двумя глазами. Когда предмет рассматривается обоими глазами, то на сетчатке каждого из них получается изображение этого предмета. Тем не менее, когда изображения попадают на соответствующие места сетчатки, то мы не видим предметов двойными. В этом случае два впечатления сливаются в одно.

Рассматривая предмет обоими глазами, мы ощущаем три измерения: ширину, высоту и глубину, и ясно отличаем более близкие предметы от удалённых. При зрении одним глазом восприятие трёхмерного пространства значительно ослабляется.

Зрение двумя глазами позволяет нам также судить о величине предмета и его удалённости от глаза.

Рассматривая предмет двумя глазами, мы сводим линии зрения то на более близкие, то на более удалённые точки предмета. При этом глазные мышцы испытывают различные напряже-

ния. По степени этих мышечных напряжений мы на основании жизненного опыта и судим об удалённости от нас предмета.

163. Сохранение зрительных ощущений. Кино. Раздражение сетчатой оболочки не исчезает мгновенно с прекращением вызвавшего его действия света, но продолжается в течение приблизительно 0,1 секунды. Поэтому ряд световых раздражений, перерывы между которыми не превышают 0,1 секунды, дают сливающееся в одно впечатление. На этом основано действие кино.

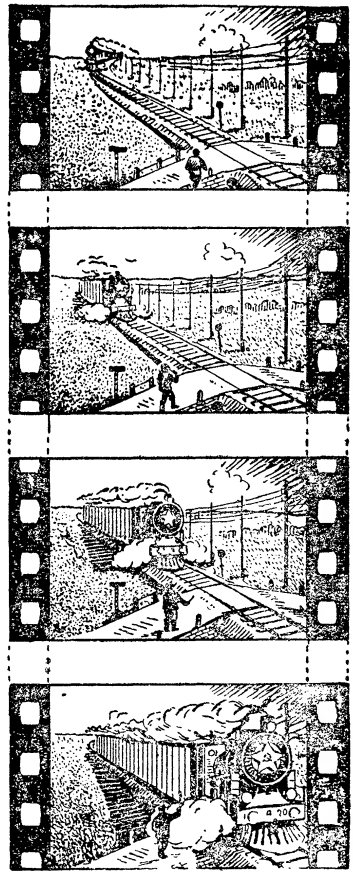


Рис. 298. Кинокадры.

На длинной ленте из целлулоида снимают ряд фотографических снимков с какого-нибудь движущегося предмета (рис. 298). Приготовленную таким образом ленту проецируют на экран при помощи проекционного фонаря, снабжённого приспособлением для передвигания ленты на один снимок (кадр). Смена одного снимка другим производится столь быстро, что зритель не замечает этой смены благодаря способности глаза сохранять зрительное ощущение.

Кино имеет не только зрелищное, но и большое научное значение. При помощи кино мы можем подробно наблюдать последовательные фазы хода различных процессов, заставляя их фотоснимки пробегать на экране с какой угодно скоростью. Таким образом, мы можем в короткое время наблюдать за такими, например, длительными процессами, как развитие цветка, движение планеты между звёздами. Для этих целей делается ряд последовательных снимков через равные, достаточно большие промежутки времени, и эти снимки пропускают через киноаппарат с нормальной скоростью 24 снимка в секунду.

Точно так же можно получить замедленные картины таких, например, процессов, как полёт снаряда из орудия. Для этого необходимо производить съёмку с громадной скоростью.

Съёмка с такой скоростью происходит в малые доли секунды, в течение которых получается ряд снимков, отличающихся друг

от друга во времени на ничтожные доли секунды. При проецировании же перед нами проходят снимки с нормальной скоростью, 24 снимка в секунду, вследствие чего заснятое быстрое явление мы рассматриваем замедленным и успеваем различать отдельные фазы его.

164. Оптические приборы, вооружающие глаз. Как уже отмечалось, чем больше угол зрения, под которым мы видим какой-нибудь предмет, тем больше деталей мы можем на нём рассмотреть. Величина угла зрения зависит как от размеров рассматриваемого объекта, так и от расстояния до него. Возможности глаза ограничены, с одной стороны, тем наименьшим углом зрения, при котором глаз вообще что-либо может увидеть, а с другой — наличием предела аккомодации, при котором дальнейшее приближение объекта к глазу становится бесполезным. Различные оптические приборы, увеличивая угол зрения, позволяют намного раздвинуть границы естественных возможностей глаза.

Применяемые оптические приборы, увеличивающие угол зрения, относятся к двум группам: 1) приборы для рассматривания мелких объектов (микроскопы); 2) приборы для рассматривания далёких объектов (телескопы).

К первой группе относятся лупы и микроскопы, ко второй — зрительные трубы, бинокли, рефракторы, рефлекторы и т. п.

В отличие от проекционного фонаря и фотоаппарата, дающих действительные изображения на экранах, в приборах, вооружающих глаз, рассматриваются мнимые изображения.

165. Лупа. Лупа — короткофокусная двояковыпуклая линза или система линз, действующих как одна собирающая линза.

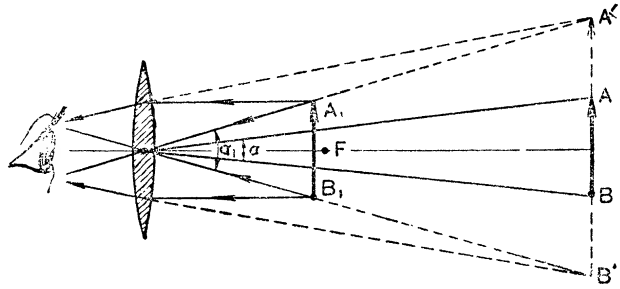


Рис. 299. Изображение предмета в лупе.

Действие лупы показано на рисунке 299. Предмет AB на расстоянии наилучшего зрения виден под углом α. Если этот угол очень мал, то детали предмета трудно различить. Для увеличения угла зрения можно приблизить предмет к глазу в положение A_1B_1. В этом положении предмет будет рассматриваться под углом зрения α_1, бóльшим α. Однако и в этом случае можно не различить деталей предмета вследствие того, что предмет находится слишком близко к глазу (за пределами аккомодации глаза).

Но если мы поместим между предметом A_1B_1 и глазом лупу так, чтобы даваемое ею изображение предмета оказалось в положении $A'B'$ (это будет тогда, когда предмет будет между фокусом лупы и её оптическим центром), то предмет будет рассматриваться под тем же увеличенным углом зрения α_1 на расстоянии наилучшего зрения.

На практике применяются лупы с фокусным расстоянием от 100 до 10 *мм*.

Увеличение лупы, как это видно из рисунка 299, приближённо равно $k=\frac{D}{F}$, где D — расстояние наилучшего зрения, F — фокусное расстояние линзы (центр лупы практически можно считать совмещённым с центром глаза).

Так как $D=250$ *мм*, то обычно применяемые лупы дают увеличение от 2,5 до 25.

Для рассматривания очень мелких предметов применяют микроскопы.

166. Микроскоп. Оптическая система микроскопа (рис. 300) состоит из объектива O_1 и окуляра O_2, оптические оси которых совпадают. Предмет AB помещают перед объективом на расстоянии, немного большем фокусного.

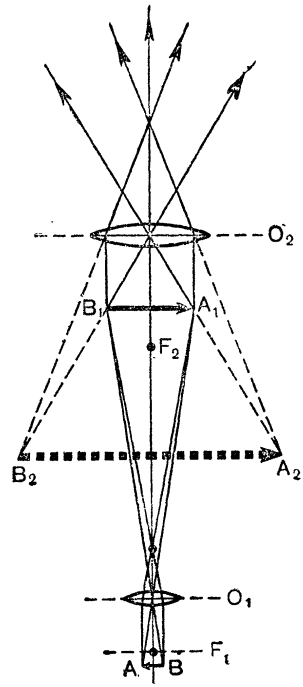


Рис. 300. Ход лучей в микроскопе.

Объектив даёт действительное, увеличенное и обратное изображение A_1B_1; положение его можно определить обычным способом, проводя из точек предмета один луч параллельно оптической оси, который, пройдя линзу O_1, получит направление на главный фокус F_1, а второй через оптический центр линзы. Это изображение рассматривают в окуляр O_2, который даёт, как и лупа, изображение A_2B_2 — мнимое, увеличенное и обратное по отношению к предмету AB. Если расстояние F_1F_2 между фокусами объектива и окуляра обозначить буквой δ, то увеличение объектива будет равно $\frac{\delta}{F_1}$, где F_1 — фокусное расстояние объектива; увеличение окуляра, как у простой лупы, равно $\frac{D}{F_2}$, где D — расстояние наилучшего зрения, а F_2 — фокусное расстояние окуляра.

Поэтому полное увеличение микроскопа равно:

$$k=\frac{\delta D}{F_1F_2}.$$

Как объектив, так и окуляр представляют сложные системы

линз, назначение которых — обеспечить высокое качество изображений.

В современных оптических микроскопах наибольшее увеличение достигает 2500.

Частицы размером меньше 0,3 микрона (*мк*) в микроскопе неразличимы. Причиной этого является дифракция света (глава IX).

167. Телескоп-рефрактор. Телескоп — астрономический инструмент, предназначенный для рассматривания небесных светил.

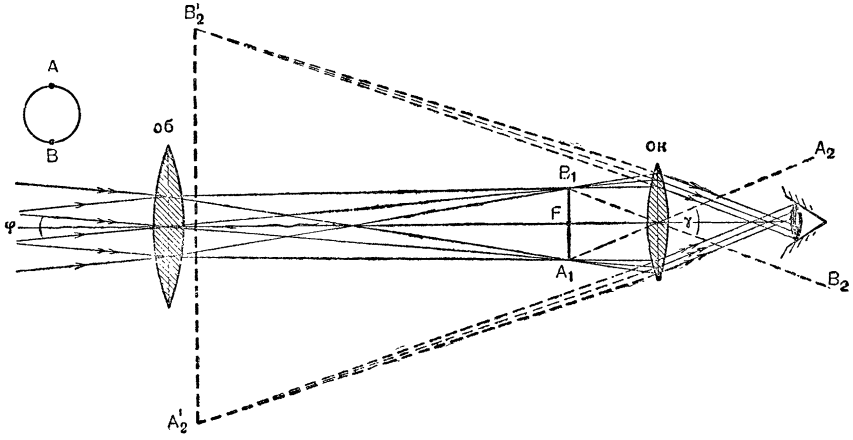


Рис. 301. Ход лучей в телескопе.

Телескопы подразделяются на рефракторы, в которых увеличение угла зрения достигается при помощи системы линз, и рефлекторы, главную часть которых представляет параболическое зеркало.

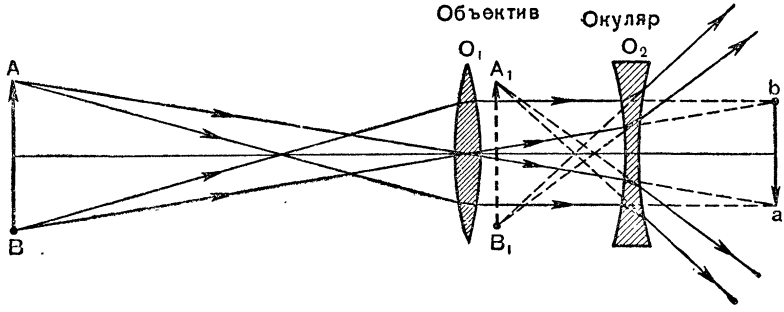


Рис. 302. Ход лучей в трубе Галилея.

Оптическая система рефрактора сложная и состоит из выпуклого длиннофокусного объектива (рис. 301), обращённого к предмету (объекту), и выпуклого короткофокусного окуляра, помещающегося перед глазом. Такой рефрактор носит название трубы Кеплера. Назначение объектива — получить действительное изображение светила. При значительном (по срав-

нению с фокусным расстоянием объектива) удалении светила от объектива лучи, исходящие из любой точки светила, будут практически параллельными; поэтому действительное, обратное и уменьшённое изображение светила получится в фокальной плоскости объектива или, точнее, очень близко от неё.

В верхней части рисунка 301 условно изображена наблюдаемая в телескоп планета.

Пусть A и B — две какие-либо диаметрально противоположные точки рассматриваемого светила. На рисунке 301 лучи, идущие от точки B, обозначены одинарными стрелками, лучи, идущие от точки A,— двойными. Лучи поступают в объектив телескопа под тем же углом, под которым мы видим планету невооружённым глазом,— под углом φ. Лучи, идущие от точек A и B, объективом собираются соответственно в точках A_1 и B_1, находящихся в фокальной или почти в фокальной плоскости объектива, где и получается обратное, действительное изображение планеты. Окуляр в телескопе располагается так, что его передний фокус совпадает с задним фокусом объектива. Таким образом, действительное изображение планеты оказывается расположенным также и в фокальной плоскости окуляра. Поэтому пучки лучей, пройдя через точки A_1 и B_1 передней фокальной плоскости окуляра и преломившись в окуляре, идут дальше в виде пучков параллельных лучей. Для определения направления этих параллельных пучков на рисунке 301 из точек A_1 и B_1 проведены лучи A_1A_2 и B_1B_2, проходящие через оптический центр окуляра.

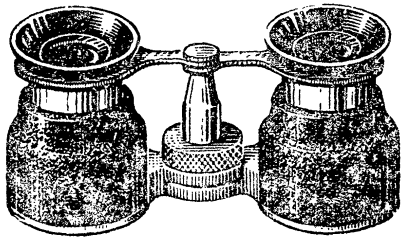


Рис. 303. Театральный бинокль.

Пучки, вышедшие из окуляра, образуют между собой угол γ. Под этим углом γ глаз наблюдателя рассматривает изображение планеты $A_2'B_2'$.

Угол γ значительно больше угла φ, что и обусловливает увеличение, даваемое телескопом.

Мерой увеличения телескопа служит отношение $\frac{\gamma}{\varphi}$, которое, как это видно из рисунка 301, в силу малости углов φ и γ можно приравнять отношению $\frac{F_{об}}{F_{ок}}$. Если обозначить увеличение телескопа буквой k, то можно написать:

$$k=\frac{F_{об}}{F_{ок}}.$$

168. Зрительная труба. Бинокль. Зрительные трубы предназначаются для наблюдения земных объектов.

На рисунке 302 изображена схема трубы Галилея. В этом приборе лучи света, идущие от отдельных точек предмета

AB, пройдя через собирающую линзу (объектив O_1), становятся сходящимися. Эти лучи дали бы обратное, уменьшённое изображение ab, но ещё до образования его они попадают на рассеивающую линзу (окуляр O_2) и вновь становятся расходящимися. Если такие лучи попадут к нам в глаз, то мы увидим мнимое, прямое изображение A_1B_1 предмета.

Бинокли небольшого увеличения (так называемые театральные бинокли) состоят из двух труб Галилея (рис. 303).

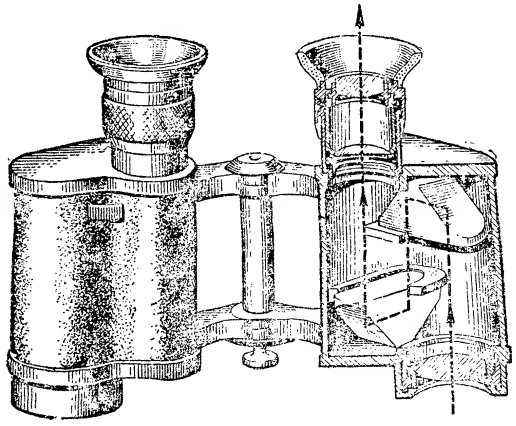


Рис. 304. Призматический бинокль.

Бинокли большого увеличения (полевые бинокли) делаются из двух труб Кеплера (рис. 304). Системой, оборачивающей изображение в этом приборе, являются две призмы полного отражения (две оборотные призмы). Одновременно эти призмы позволяют укоротить длину труб и увеличить расстояние между центрами объективов по сравнению с расстоянием между зрачками глаз. Большое расстояние между объективами увеличивает стереоскопический эффект.

Упражнение 21.

1. Изображение диапозитива размером 8,5×8,5 *см* желают получить на экране, имеющем размеры 1,5×2 *м*, находящемся на расстоянии $f=6$ *м* от проекционного аппарата. Какое фокусное расстояние должен иметь для этой цели объектив?

2. Какое увеличение даёт лупа в 10 диоптрий?

3. Фокусное расстояние объектива микроскопа 4 *мм*, а окуляра 2,5 *см*. Определить увеличение этого микроскопа, если предмет помещается на 0,2 *мм* дальше главного фокуса объектива.

4. Объектив телескопа имеет фокусное расстояние 10 *м*, а окуляр 5 *см*. Определить увеличение, даваемое этим телескопом.

ГЛАВА IX

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

169. Интерференция волн. К числу явлений, характерных для волновых процессов, относится интерференция волн, заключающаяся в том, что при взаимном наложении двух волн может происходить усиление и ослабление колебаний. Чтобы ознакомиться с этим явлением, рассмотрим, что произойдёт, если в некоторую точку пространства будут приходить волны одинаковой длины.

Пронаблюдаем это явление на примере волн, распространяющихся по поверхности воды.

Будем непрерывно создавать волны на поверхности воды в двух каких-нибудь её точках. Для этого в непосредственной близости к поверхности воды поместим концы двух проволочек, приделанных к упругой металлической пластинке.

При колебании пластинки концы проволочек будут периодически погружаться в воду и возбуждать колебания, распространяющиеся в виде волн одинаковой длины по её поверхности. Каждая из проволочек возбуждает свою систему волн. Две системы волн, налагаясь одна на другую, будут взаимодействовать. В результате получится картина, изображённая на рисунке 305.

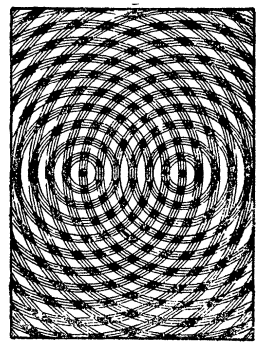


Рис. 305. Интерференция волн на воде.

Для дальнейшего важно, чтобы две системы волн были согласованы, т. е. чтобы при одинаковой длине они выходили из центров колебания в одинаковых фазах, или, если они при возникновении сдвинуты по фазе (например, возникали в противоположных фазах), то сдвиг фаз со временем *не должен меняться*. Такие волны называются *когерентными*.

В данном опыте когерентность обеспечена тем, что оба конца проволоки периодически касаются поверхности воды одновременно — волны оставляют центры колебания в одинаковых фазах.

Построим картину наложения двух систем когерентных волн. На рисунке 306 сплошными окружностями обозначены гребни

кольцевых волн, распространяющихся по поверхности воды от источников, а пунктирными — впадины. Точки, где встречаются волны обеих систем в одинаковых фазах, впадина с впадиной и гребень с гребнем,— точки усиленных колебаний (максимумы), расположены на сплошных линиях *aa*. Точки же ослабленных колебаний (минимумы), в которых встречается впадина одной волны с гребнем другой, расположены вдоль пунктирных линий *bb*.

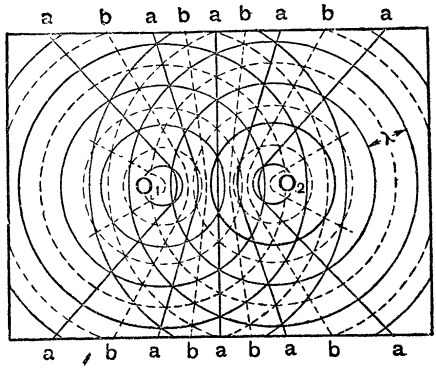


Рис. 306. Построение картины наложения двух систем когерентных волн.

При наличии когерентности волн картина чередования максимумов и минимумов будет устойчивой. В самом деле, если в данный момент в какой-либо точке встречаются гребень с гребнем, то через полпериода там же встретятся впадина с впадиной, а ещё через полпериода опять гребень с гребнем и т. д., т. е. в данной точке всё время будет максимум колебаний.

Сопоставляя построенную картину наложения когерентных волн с фотографией наложения волн на поверхности воды в описанном выше опыте (рис. 305), мы видим и на фотографии чередование максимумов и минимумов.

Такое чередование максимумов и минимумов амплитуд колебаний называется интерференционной картиной.

Явление наложения волн, образующее интерференционную картину, называется интерференцией волн.

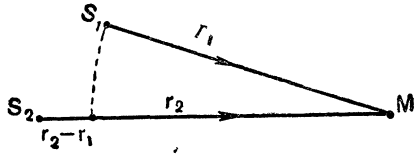


Рис. 307. Разность хода двух волн.

Для решения вопроса о том, в каких фазах встретятся в данной точке интерферирующие волны, нужно учесть разность хода этих волн. Пусть нас интересует результат наложения волн в точке M (рис. 307), находящейся на расстоянии r_1 от первого источника волн S_1 и на расстоянии r_2 от второго источника S_2. Расстояние $r_2 - r_1$ называется разностью хода волн. Если источники волн колебались в одинаковых фазах, то при разности хода, равной целому числу длин волн или чётному числу полуволн, в точку M волны будут приходить в одинаковых фазах и при сложении их в точке M возникает усиление колебаний. Если же разность хода окажется равной нечётному числу полуволн, то волны от S_1 и S_2 придут в эту точку в противоположных фазах и в ней произойдёт ослабление колебаний.

Это положение легко проверить на построенной интерференционной картине (см. рис. 306). Для этого достаточно сосчитать число волн соответствующей системы, укладывающихся на расстояниях между интересующими нас точками максимумов и минимумов и центрами колебаний. Мы увидим, что максимумы будут в тех точках, которые или находятся на одинаковых расстояниях от обоих центров, или в точках, где разность хода соответствует чётному числу полуволн, а минимумы — нечётному числу.

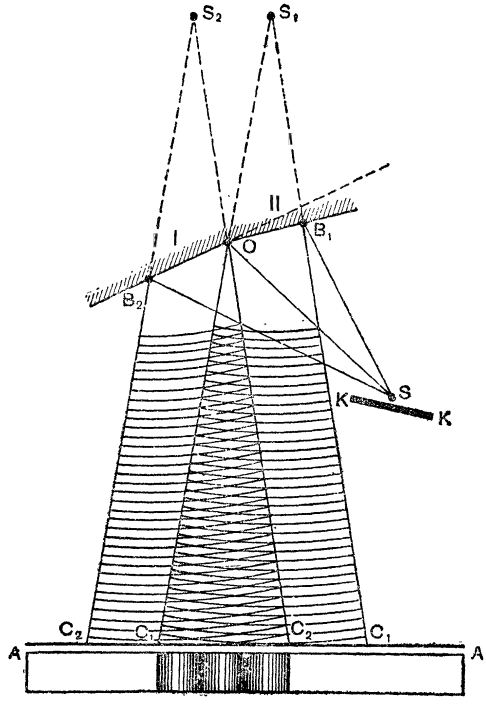


Рис. 308. Интерференция света при помощи зеркал Френеля.

170. Интерференция света. Явление интерференции волн присуще не только волнам на поверхности воды, но и всем видам волн: звуковым, электромагнитным и другим. Стало быть, если свет обладает волновыми свойствами, то наложение двух пучков света может привести не только к усилению, но и к ослаблению света. А это значит, что совместное действие двух световых пучков может привести к возникновению темноты, или, выражаясь фигурально, свет плюс свет может дать темноту. Опыт подтверждает это заключение.

Получить систему когерентных световых волн можно, если пучок света, исходящий от источника, каким-либо способом расчленить на два пучка и затем оба эти пучка свести вместе, при этом световые пучки проходят различные пути; этим создаётся разность хода, и при наложении пучки интерферируют.

Существуют разные способы, позволяющие осуществить указанные условия.

В одном из опытов французского физика Френеля пучок света от точечного источника разделяется на два пучка при помощи двух зеркал, поставленных друг к другу под углом, близким 180°.

На рисунке 308 показан путь лучей от источника S к экрану AA. Прямые лучи не попадают на экран, так как их задерживает перегородка KK.

К экрану от источника S приходят световые волны, идущие по двум путям разной длины и поэтому запаздывающие относительно друг друга. Волны, идущие от S и отражающиеся зеркалами I и II, представляют собой две системы когерентных волн $SB_1OC_1C_1$ и $SOB_2C_2C_2$, как бы исходящих от источника S_1 и S_2, которые являются мнимыми изображениями S в зеркалах I и II.

В пространстве OC_1C_2 эти обе системы волн налагаются друг на друга и интерферируют. На экране AA, помещённом в пространстве OC_1C_2, наблюдается чередование светлых и тёмных полос.

Описанный опыт Френеля по наблюдению интерференции света принципиально прост, однако технически, в условиях школьного физического кабинета, осуществить его трудно.

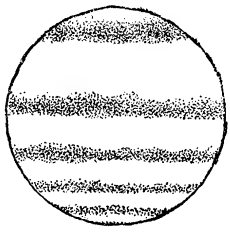


Рис. 309. Интерференционные полосы на мыльной плёнке.

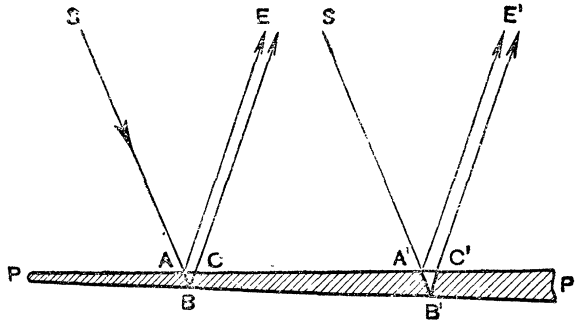


Рис. 309а. Рисунок, поясняющий явления, происходящие в мыльной плёнке при освещении её однородным светом.

Расщепление светового пучка на два пучка с последующим наложением друг на друга имеет место и при освещении лучами света тонких плёнок. Очень легко наблюдать, например, интерференцию света при отражении его от тонкой мыльной плёнки.

Получив на проволочной рамке мыльную плёнку и осветив её красным светом от источника, при помощи собирающей линзы спроецируем нашу плёнку на экран. На экране изображение плёнки вначале кажется равномерно освещённым. Но по мере утончения плёнки вследствие стекания воды (сначала в верхних, а затем в других частях её) появляются чередующиеся горизонтальные тёмные и красные полосы (рис. 309). При дальнейшем утончении плёнки наблюдаемая картина меняется: на месте тёмных полос появляются красные и наоборот. Аналогичные картины наблюдались бы и при освещении мыльной плёнки любым однородным светом. Такие же картины наблюдались бы при освещении плёнок других веществ, например нефтяных плёнок на поверхности воды.

Рисунок 309а поясняет явления, происходящие в мыльной плёнке при освещении её однородным светом. Заштрихованная полоса PP представляет поперечное сечение какого-либо участка

мыльной плёнки. На плёнку падает пучок параллельных лучей SS однородного света. Отразившись от верхней и нижней граней (в точках A, B и A', B') и приобретя при этом разность хода, лучи при наложении в направлениях AE и $A'E'$ интерферируют между собой. Если их собрать линзой, то на экране получим ряд светлых полос, разделённых тёмными промежутками. При освещении плёнки белым светом интерференционная картина получается разноцветной. Это есть следствие сложности белого света, в состав которого входят волны различной длины, образующие при интерференции максимумы или минимумы света в различных местах.

Наличие чередующихся тёмных и светлых полос в случае монохроматического света и наличие чередующихся сплошных спектров в случае белого света указывает на волновые свойства света.

Упражнение 22.

1. Изготовьте мыльный раствор и с помощью стеклянной трубочки или пипетки выдуйте мыльный пузырь; наблюдайте за игрой цветов на поверхности пузыря.

2. Изготовьте из проволочки небольшой каркас в виде прямоугольника и, затянув его мыльной плёнкой, понаблюдайте за игрой цветов на поверхности её.

Если у вас найдётся какое-нибудь цветное стекло или окрашенный кусок целлофана (лучше красного цвета), наблюдайте через эти фильтры за интерференционной картиной на мыльной плёнке.

Зарисуйте и опишите наблюдаемые явления.

3. Поверхность мыльных пузырей и плёнок вследствие стекания жидкости постепенно утончается. Проследите, как при этом меняется окраска плёнок вплоть до того, как они лопнут.

4. Налейте в плоскую кюветку (можно в блюдце) воды и на дно кюветки положите чёрную бумагу. Осветите сбоку поверхность воды и после этого капните каплю скипидара на воду. Капля, растекаясь по воде, образует тонкую плёнку, в которой падающий пучок лучей света будет интерферировать. Результат интерференции можно наблюдать где-нибудь на стене в виде окрашенного зайчика, образованного отражением от плёнки пучка лучей. Проделайте этот опыт.

171. Дифракция волн. Лёгкий ветер вызывает на поверхности водоёма рябь — волны малой длины и амплитуды. Если они на своём пути встретят препятствия, например торчащую над поверхностью воды сваю и сучок, то с подветренной стороны за препятствиями наблюдаются различные картины. Непосредственно за сваей вода спокойна, волнения нет. Не то за сучком: волны огибают сучок.

Явление огибания волнами встречающихся препятствий называется дифракцией волн.

В нашем примере дифракция волн наблюдается за сучком и не наблюдается за сваей. Почему?

Дело в том, что диаметр сучка не так велик сравнительно с длиной падающих на него волн, а диаметр сваи во много раз превосходит эту длину.

Получим в ванне на поверхности воды систему волн и ограничим их дальнейшее распространение отверстием, ширина которого в несколько раз больше длины волны.

Мы увидим, что за отверстием волны распространяются в области, ограниченной прямыми линиями (на рис. 310 пунктирные линии), перпендикулярными к поверхности падающих волн.

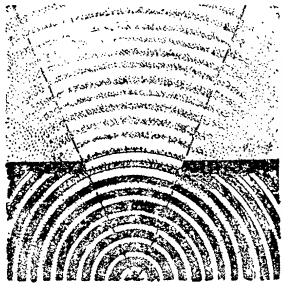


Рис. 310. Волна, проходя большое отверстие, распространяется в области, ограниченной прямыми линиями.

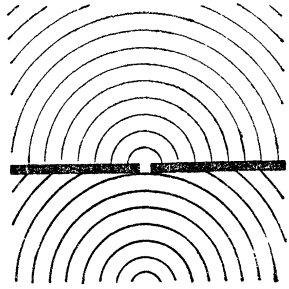


Рис. 311. Область за малым отверстием заполнена круговыми волнами.

Только на сравнительно большом расстоянии от отверстия волны, слегка загибаясь, заходят за эти прямые.

Сузим ограничивающее отверстие до размера, меньшего длины волны падающих волн. Область за отверстием окажется

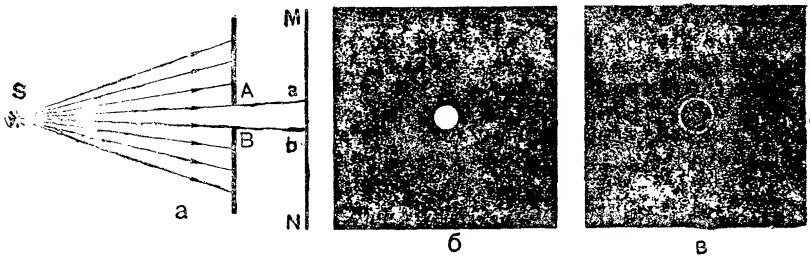


Рис. 312. Дифракция света от круглого отверстия:

а — схема расположения опыта; *б* — освещённость экрана, когда диаметр отверстия сравним с расстоянием до экрана; *в* — освещённость экрана, когда диаметр отверстия в тысячи раз меньше расстояния до экрана.

заполненной круговыми волнами, центром которых служит малое отверстие (рис. 311); наблюдается дифракция волн.

Из-за дифракции, между прочим, трудно наблюдать явление «звуковой тени», так как длины звуковых волн обычно сравнимы с размерами препятствий и поэтому звуковые волны их огибают.

172. Дифракция света. Если свет представляет собой волновой процесс, то и для него при определённых условиях должно наблюдаться явление дифракции.

Если от источника S пропустить одноцветный пучок лучей света через отверстие AB (рис. 312, *а*), то на экране MN мы получим светлое пятно ab (рис. 312, *б*). Диаметр этого пятна характеризует ширину падающего на экран MN светового пучка. При уменьшении отверстия AB уменьшается и пятно, т. е. сужается пучок лучей света. Однако, начиная с некоторой величины отверстия (порядка 0,01 *мм* и меньше), дальнейшее его уменьшение вызывает не уменьшение пятна ab, а, наоборот, увеличение. При этом пятно теряет свою резкость, оно расширено и неравномерно освещено (рис. 312, *в*). На нём появляется ряд чередующихся светлых и тёмных колец, заполняющих область значительно более широкую, чем это следует из геометрических построений, основанных на факте прямолинейного распространения света.

Распределение освещённости, наблюдаемое на экране при дифракции от узкой щели, показано на рисунке 313.

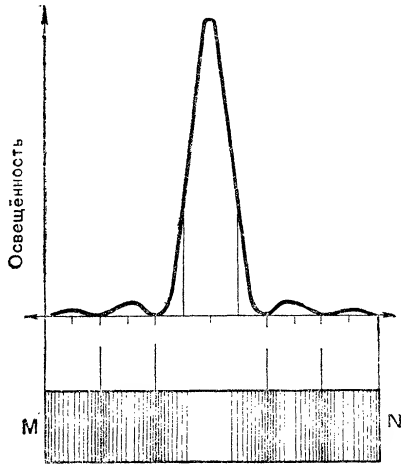


Рис. 313. Распределение освещённости на экране при прохождении света через узкое отверстие.

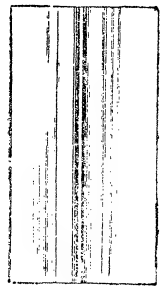


Рис. 314. Дифракция от тонкой проволоки. Внутри тени наблюдаются области, куда заходит свет, а края тени окаймлены рядом светлых и тёмных полос.

Если на пути узкого пучка лучей света поставить тонкое препятствие (иголку, волос), то на экране мы получим ряд тёмных и светлых полос (рис. 314). В центре геометрической тени получается при этом светлая полоса.

Все эти явления наблюдаются в одноцветном (монохроматическом) свете; если же пользоваться белым светом, то вместо тёмных и светлых полос будут наблюдаться окрашенные полосы.

Описанные нами явления отступления света от законов прямолинейного распространения — загибание света в область тени — носят название дифракции света.

Длина световых волн чрезвычайно мала. У видимых лучей света длины волн лежат в пределах от 0,8 до 0,4 микрона. Размеры большинства тел очень велики по сравнению с длинами световых волн, огибать такие тела световые волны не могут.

В этих случаях можно сказать, что свет распространяется прямолинейно. Когда же на пути световых волн находятся тела или отверстия, размеры которых соизмеримы с длиной световой волны, то становится заметной дифракция световых волн.

Явления дифракции встречаются часто и бывают очень разнообразны. Так, например, если смотреть на узкий источник света (волосок электрической лампочки, узкое пламя спиртовой горелки и т. д.) через сетку глазных ресниц, то, кроме самого источника света, слева и справа от него увидим несколько полос с радужной окраской. Такая же картина наблюдается при рассмотрении источника света сквозь частый гребешок.

Интересная дифракционная картина обнаруживается при наблюдении какого-нибудь отдалённого светящегося предмета через ткань носового платка.

Нередко можно наблюдать около Солнца и Луны радужные «венцы». Они наблюдаются тогда, когда в воздухе носится морозная пыль или туман. Свет от Солнца или Луны, проходя через такую среду, претерпевает дифракцию.

Упражнение 23.

1. Проделайте иглой в куске картона отверстие и посмотрите через него на раскалённый волосок электрической лампочки. Зарисуйте и опишите наблюдаемую вами картину. Тот же самый опыт проделайте, поставив перед отверстием окрашенное стекло или целлофановую плёнку (цветной фильтр). Как изменится наблюдаемое явление?

2. Наклейте на стекло два лезвия от безопасной бритвы так, чтобы между ними образовалась узкая шель, и при помощи такого прибора рассмотрите различные источники света. Воспользуйтесь также цветным фильтром. Зарисуйте и опишите наблюдаемые явления.

3. Натяните на рамочку тонкую проволоку (или волос) и, держа последнюю в вытянутой руке перед глазами, рассмотрите её через лупу. Зарисуйте и опишите наблюдаемые вами явления.

4. Очистите от светочувствительного слоя две небольшие фотопластинки (6×9 *см*) и высушите их. Обсыпьте одну пластинку ровным слоем ликоподия. Чтобы лучше пристал к ней ликоподий, предварительно подышите на пластинку. Обсыпанную ликоподием пластинку покройте другой пластинкой и окантуйте бумагой края обеих пластинок. Наблюдайте через изготовленный таким образом прибор различные источники света.

173. Дисперсия света. Опыты Ньютона. Мы знаем, что пучок света, проходя через треугольную призму, отклоняется к грани, лежащей против преломляющего угла призмы (рис. 275а). Однако, если это будет пучок белого света, то после прохождения через призму он не только отклоняется, но и разлагается на цветные пучки. Это явление, называемое дисперсией света, было впервые изучено Исааком Ньютоном в 1666 г. в серии замечательных опытов (рис. 315).

Источником света в опытах Ньютона служило небольшое круглое отверстие S в ставне окна AB, освещаемого лучами Солнца. Когда перед отверстием устанавливалась призма P, то на стене вместо круглого пятна появлялась окрашенная полоска MN, названная Ньютоном спектром. В таком спектре оказа-

лось семь главных цветов: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый, постепенно переходящих один в другой. Каждый из них занимает в спектре пространство различного размера. Наибольшую длину имеет фиолетовая полоса, наименьшую — красная.

Следующий опыт состоял в том, что из широкого пучка цветных лучей, полученных с помощью призмы P_1, экраном C с небольшим отверстием выделялись узкие пучки определённой цветности (рис. 316) и направлялись на вторую призму P_2.

Призма P_2, отклоняя их, не изменяет цвета этих лучей. Такие лучи называются простыми или монохроматическими (одноцветными).

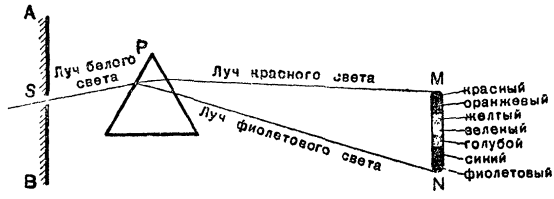


Рис. 315. Опыт Ньютона. При прохождении пучка солнечных лучей через призму образуется спектр.

Опыт показывает, что красные лучи испытывают меньшее отклонение, чем фиолетовые, т. е. лучи различной цветности неодинаково преломляются призмой.

Собирая линзой вышедшие из призмы цветные пучки лучей, Ньютон получил на белом экране вместо окрашенной полосы белое изображение отверстия.

Из всех этих опытов Ньютон сделал следующие выводы:

1) ***Белый свет является сложным светом, состоящим из цветных лучей.***

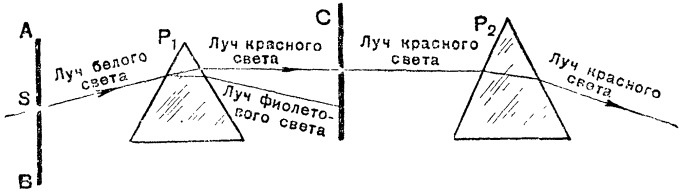


Рис. 316. Опыт Ньютона. Призма P_2, отклоняя лучи одной цветности, выделенные экраном C, не изменяет цвета этих лучей.

2) ***Для лучей света различной цветности показатели преломления данного вещества различны; вследствие этого при отклонении призмой пучок белого света разлагается в спектр.***

3) ***При соединении цветных лучей спектра вновь образуется белый свет.***

Явление дисперсии света наблюдается не только при прохождении света через призму, но и во многих других случаях преломления света. Так, например, преломление солнечного света

в водяных каплях, образующихся в атмосфере, сопровождается разложением его на цветные лучи; этим объясняется образование радуги.

174. Длины волн и цветность лучей. Согласно волновой теории, цвет луча света определяется его длиной волны, или частотой колебаний. Цвет луча, таким образом, аналогичен высоте звукового тона, которая, как известно, определяется также частотой колебаний.

Подобно тому как мы звуки располагаем в один непрерывный ряд по возрастающей частоте колебаний, мы и все световые лучи можем себе представить расположенными в один ряд по возрастающей частоте колебаний, т. е. по убывающей длине волны.

В процессе преломления в призме из пучка белого света выделяется множество цветных пучков, и каждому из них соответствует некоторая узкая область длин волн, заключённых в интервале между 400—800 миллимикрон.

Спектральная область	Длина волны (в *ммк*)
Красных лучей	760—640
Оранжевых и жёлтых лучей .	640—580
Зелёных лучей	580—495
Голубых и синих лучей	495—440
Фиолетовых лучей	440—400

Итак, показатель преломления вещества зависит от длины световой волны. Это и является причиной дисперсии света. На рисунке 317 показан график зависимости показателя преломления от длины волны для стекла (1), кварца (2) и флюорита (3).

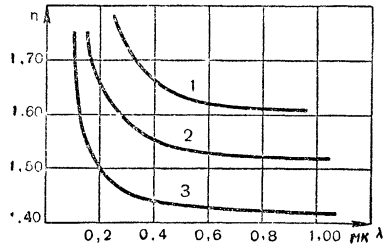


Рис. 317. График зависимости показателя преломления от длины волны.

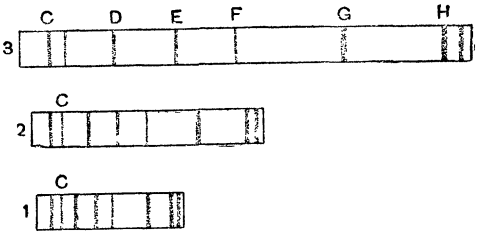


Рис. 318. Сравнительная величина спектров, полученных при помощи призм одинаковой формы.

1 — вода; *2* — лёгкий крон; *3* — тяжёлый флинт.

На рисунке 318 дана сравнительная величина солнечных спектров, полученных при помощи призм одинаковой формы, сделанных из разных материалов.

175. Спектрограф и спектроскоп. Ньютон для получения спектра направлял на призму довольно широкий цилиндрический пучок солнечного света через круглое отверстие, сделанное в ставне.

Полученный таким способом спектр представляет собой ряд разноцветных изображений круглого отверстия, частично налагающихся друг на друга. Для получения более чистого спектра Ньютон предложил пользоваться не круглым отверстием, а узкой щелью, параллельной преломляющему ребру призмы.

Схема такой установки для получения спектра изображена на рисунке 319. При помощи линзы L на экране MN получают чёт-

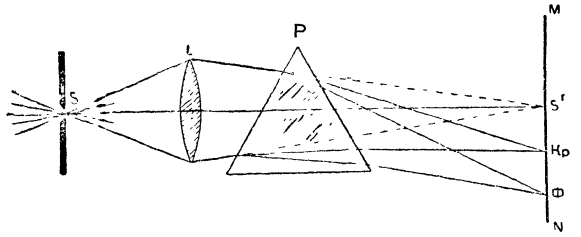


Рис. 319. Схема установки для получения дисперсии света.

кое изображение S' щели S, после чего за линзой устанавливается призма P, которая даёт спектр.

Наиболее чистые и яркие спектры получают при помощи специальных приборов — спектроскопов и спектрографов. Схема устройства спектрографа изображена на рисунке 320.

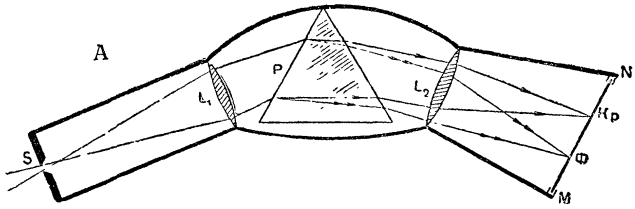


Рис. 320. Схема устройства спектрографа.

В трубе A, называемой коллиматором, имеется узкая щель S, расположенная в фокальной плоскости линзы L_1. Благодаря этому свет, упавший на щель, пройдя линзу L_1, параллельным пучком падает на призму P и разлагается на цветные параллельные пучки. Но так как лучи различной цветности отклоняются на разные углы, то из призмы выходят параллельные пучки разных направлений. Линза L_2 собирает эти пучки в различных точках своей фокальной плоскости MN. В этой плоскости получаются цветные изображения щели, т. е. спектр. Если в плоскости MN

поместить матовое стекло, то на нём мы получим изображение спектра. Помещая на это место фотопластинку, можно сфотографировать спектр. Прибор, в котором спектр получается на фотопластинке, называется спектрографом.

В спектроскопах, предназначенных для непосредственного наблюдения спектров, спектр, получаемый в фокальной плоскости линзы L_2, рассматривается глазом через линзу, служащую лупой.

176. Спектры испускания. Твёрдое тело начинает светиться при температуре около 500° С. Рассматривая спектр этого тела, мы замечаем красную полосу. По мере повышения температуры тела красная полоса расширяется, в спектре начинают появляться другие цвета: оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой и т. д. При белом калении мы видим сплошной спектр, начиная от красной до фиолетовой части.

Спектры пламени свечи, керосиновой лампы являются сплошными; эти спектры дают накалённые частицы твёрдого вещества, находящиеся в пламени. Сплошной спектр можно увидеть, рассматривая спектр накалённой нити электрической лампы или спектр, испускаемый поверхностью расплавленного металла, плавящегося при высокой температуре, например чугуна.

Если рассматривать через спектроскоп бесцветное пламя газовой горелки, то мы увидим очень слабый спектр, испускаемый незначительным количеством твёрдых раскалённых частиц угля, всегда имеющихся в газовом пламени.

Введём в пламя газовой горелки кусок асбеста, пропитанный раствором поваренной соли. Пары натрия окрашивают пламя в жёлтый цвет, и в спектре появляется яркая жёлтая линия. Помещая в пламя горелки растворы других солей, будем получать иного вида спектры, состоящие из большего или меньшего числа отдельных цветных линий, расположенных в различных областях спектра.

Точно так же светящиеся при электрических разрядах разрежённые газы дают спектры, состоящие из отдельных цветных линий; такие спектры называются линейчатыми. В некоторых случаях спектры светящихся паров и газов представляются полосами, ярко освещёнными с одного края и постепенно ослабевающими к другому. В хорошем спектроскопе такие спектры распадаются на весьма большое число тончайших линий. Все эти спектры называются спектрами испускания.

На цветной таблице (стр. 272) изображены спектры испускания ряда элементов и химических соединений; приведён также сплошной спектр, который дают раскалённые тела, а также спектр Солнца.

177. Спектры поглощения. Если на пути белых лучей света поместить какое-либо вещество, поглощающее те или иные лучи спектра, то мы получим на сплошном спектре тёмные линии или полосы. Местоположение этих тёмных линий или полос соответ-

ствует местоположению цветных линий или полос в спектре испускания данного вещества.

Рассмотрим спектр раскалённого тела, пропустив лучи его через пары или газы (рис. 321). Поместив на пути лучей пары натрия, мы замечаем на сплошном спектре тёмную полосу в жёлтой части спектра. Эта тёмная полоса появится в том самом месте спектра, где в спектре испускания находится жёлтая линия паров натрия.

Это явление находится в соответствии с законом Кирхгофа, согласно которому ***атомы данного элемента поглощают те световые волны, которые они сами испускают.***

Спектры раскалённых твёрдых или жидких тел, пересечённые тёмными линиями или полосами, которые получаются вследствие поглощения световых волн тех или других длин различными средами, называются спектрами поглощения.

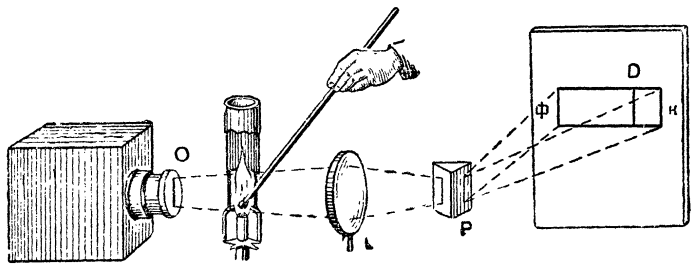


Рис. 321. Схема установки для получения спектра поглощения натрия.

Чтобы объяснить происхождение спектров, необходимо знать строение и свойства атомов. Эти вопросы будут освещены в последней главе книги.

• **178. Спектральный анализ.** ***Спектральным анализом называется метод исследования химического состава различных веществ по их спектрам поглощения и испускания.***

Свет, испускаемый раскалёнными твёрдыми и жидкими телами, даёт сплошной спектр, спектры линейчатые свойственны раскалённым парам или газам. Но спектральный анализ даёт возможность судить не только об агрегатном состоянии излучающего свет тела: этот анализ позволяет определить химический состав веществ. В самом деле, мы видели (§ 176), что светящиеся газы и пары дают линейчатый спектр, и притом каждый газ или пар даёт характерный для него спектр. Если мы в определённом месте спектра находим жёлтую линию, то можем с уверенностью утверждать, что в источнике света имеются пары натрия; если находим характерную зелёную линию, мы говорим о присутствии таллия, и т. д. Зная длины волн, испускаемых раз-

личными газами и парами, мы по спектру можем установить наличие тех или иных веществ. Если в спектре находится одна или несколько линий, которые не соответствуют линиям ни одного из известных нам элементов, мы можем утверждать, что нашли новый элемент. Этим способом удалось открыть такие элементы, как рубидий, цезий, таллий, индий, галлий.

Д. И. Менделеев, руководствуясь открытым им периодическим законом, предсказал существование целого ряда элементов, в частности элемента галлия (Менделеев называл его экаалюминием); этот элемент был открыт при помощи спектрального анализа.

Метод спектрального анализа чрезвычайно чувствителен. Этим методом можно обнаружить наличие интересующего нас элемента даже в том случае, когда количества этого элемента составляют всего 10^{-7}—10^{-8} *г*, а в некоторых особо благоприятных случаях обнаруживаются и количества, не превышающие 10^{-10} *г*. Это настолько ничтожные количества, что химическими методами они не могут быть обнаружены.

Итак, по наличию в спектре определённых спектральных линий можно судить о присутствии какого-либо элемента в изучаемом веществе, т. е. делать качественный анализ химического состава вещества. По интенсивности же спектральных линий можно судить и о количестве химического элемента в данном соединении. Однако эта связь между интенсивностью спектральной линии и количеством данного элемента довольно сложна.

Учёные разработали методы спектрального анализа и сконструировали приборы, позволяющие очень быстро выполнять анализы состава сложных сплавов, играющих огромную роль в современной технике. Пользуясь специальными приборами, в заводских лабораториях можно в течение 1—2 минут определить, например, состав различных сортов стали, из которых изготовляются ответственные части машин. Понятно, какое большое практическое значение имеют эти методы для промышленности.

179. Спектр Солнца. Рассматривая при помощи спектроскопа спектр Солнца, мы можем заметить, что сплошной спектр перерезан многочисленными тёмными линиями, находящимися в различных частях спектра. Первым описал эти тёмные линии немецкий учёный Фраунгофер (1787—1826), почему эти линии и называются фраунгоферовыми линиями.

Судя по характеру спектра, мы должны заключить, что фотосфера Солнца имеет очень высокую температуру. Тёмные фраунгоферовы линии, которыми перерезан спектр, отмечают лучи, поглощённые средой, через которую проходили лучи, идущие от поверхности Солнца к Земле. Часть энергии этих лучей поглощена газовой оболочкой, окружающей Солнце,— хромосферой, часть — земной атмосферой. Объяснение фраунгоферовых линий в спектре Солнца дал Кирхгоф. Если атомы поглощают именно те волны, которые они могут испускать (§ 177), то каждое веще-

ство, которое имеется в солнечной или земной атмосфере, будет поглощать характерные для него лучи. Это и обнаружится в появлении тёмных линий на фоне сплошного солнечного спектра. Устанавливая положение этих тёмных линий в спектре, мы можем определить, через какие вещества проходили солнечные лучи в атмосфере Солнца. Можно также установить, какие тёмные линии получаются от поглощения лучей в земной и какие в солнечной атмосфере. Так можно определить химический состав солнечной атмосферы.

Таким образом было установлено, что в солнечной атмосфере имеются водород, натрий, кальций, железо и другие вещества, встречающиеся и на Земле.

Интересно отметить, что в спектре Солнца, помимо известных элементов, был обнаружен элемент, который на Земле не был ещё известен. На этом основании сперва полагали, что, кроме известных на Земле элементов, имеется ещё какой-то особый элемент, находящийся только на Солнце. Его назвали гелием (от греческого слова гелиос — солнце). Только спустя 26 лет гелий был найден и на Земле.

180. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи. Исследуем спектр солнечного света с помощью установки, схема которой

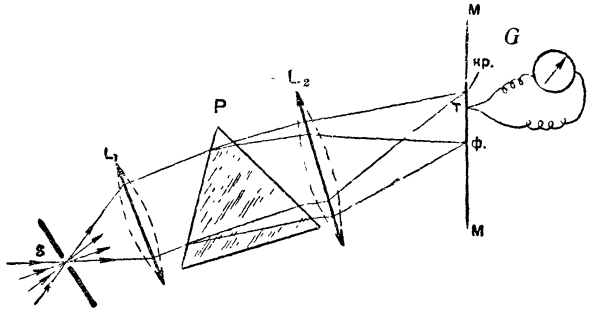


Рис. 322. Схема установки по исследованию распределения энергии в спектре.

изображена на рисунке 322. Будем перемещать спай чувствительного термоэлемента T вдоль спектра. При этом мы обнаружим наличие излучения как за красной границей спектра $Кр$, так и за фиолетовой $Ф$ (спай будет нагреваться и в этих местах, возбуждая термоток, который регистрируется гальванометром G). Этот опыт показывает, что, кроме видимого излучения, в спектре существует излучение невидимое, не воспринимаемое нашим глазом.

Излучение, которое обнаруживается за красной частью спектра, называется инфракрасным излучением, а за фиолетовой — ультрафиолетовым излучением. Инфракрасные лучи имеют бóльшую длину волны, чем видимые лучи,

а ультрафиолетовые лучи соответственно меньшую длину волны.

Мы можем исследовать таким же методом не только солнечный спектр, но и спектры излучения любых раскалённых тел. Опыт показывает, что спектральный состав излучения зависит прежде всего от температуры излучающего тела. Так, видимое излучение появляется лишь при температуре выше 500° С. При более низких температурах почти всё излучение состоит из инфракрасных лучей.

Наоборот, ультрафиолетовое излучение становится интенсивным только при относительно высоких температурах. Так, в спектре излучения обычной электрической лампочки при температурах 2000—2500° С процент ультрафиолетовых лучей ничтожно мал; в излучении же, даваемом, например, электрической дугой, где температуры превышают 3000° С, процент ультрафиолетовых лучей значительно больше.

Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи подчиняются тем же законам оптики, что и видимые лучи. Однако по своим действиям на вещества они обнаруживают резкое различие.

Наиболее характерным свойством инфракрасных лучей является их тепловое действие, поэтому и обнаруживаются они легче всего по нагреванию тел, поглощающих эти лучи. Но вместе с тем они могут оказывать и химические действия. Так, например, оказалось возможным фотографировать ночью при помощи специальных фотопластинок, чувствительных к инфракрасным лучам.

Для ультрафиолетовых же лучей наиболее характерна их большая химическая и биологическая активность. Поэтому ультрафиолетовое излучение обнаруживается легче всего по его действию на фотопластинки. Примером биологического действия ультрафиолетовых лучей является загар. Подробнее о действиях света будет рассказано в главе X.

181. Рентгеновские лучи. В 1895 г. немецкий учёный Рентген заметил, что при встрече потока быстрых электронов с каким-нибудь металлом большого атомного веса, например платиной, вольфрамом, возникает особый вид излучения. Это излучение было названо рентгеновским излучением или рентгеновскими лучами. Рентгеновские лучи, так же как и ультрафиолетовые лучи, зрительного ощущения не вызывают, но они вызывают свечение некоторых веществ и действуют на фотографическую пластинку. Благодаря этим двум свойствам они и были обнаружены. Получают их в специальных приборах, называемых рентгеновскими трубками. На рисунке 323 изображены: схема устройства (сверху) и общий вид (снизу) электронной рентгеновской трубки. Источником электронов в этой трубке служит раскалённая вольфрамовая спираль K, накаливаемая особой батареей или особым трансформатором накала. Поток электронов, вылетающих из раскалённой спирали, ускоряется в сильном электрическом поле,

созданном источником высокого напряжения между анодом и катодом. Ускоренный поток электронов падает на скошенный конец металлического стержня A, на так называемый антикатод.

При торможении ударяющихся об антикатод электронов возникает рентгеновское излучение, которое распространяется от поверхности антикатода. Кинетическая энергия электронов при их торможении частично превращается в энергию рентгеновского излучения.

Антикатод делается из тугоплавких металлов (например, из вольфрама), так как при интенсивной бомбардировке электронами он сильно нагревается. Часто антикатод приходится даже охлаждать водой при помощи особого приспособления (рис. 323, нижний).

Рентгеновские лучи свободно проходят сквозь стенки стеклянной трубки и могут быть исследованы уже вне трубки.

Если поместить фотографическую пластинку, завёрнутую в чёрную бумагу, вблизи трубки, то после облучения рентгеновскими лучами пластинка при проявлении чернеет так, как если бы на неё действовали световые лучи. Если в темноте заставить действовать трубку и поместить вблизи неё картонный экран, покрытый сернистым цинком или платино-синеродистым барием, то экран светится зелёно-голубым цветом.

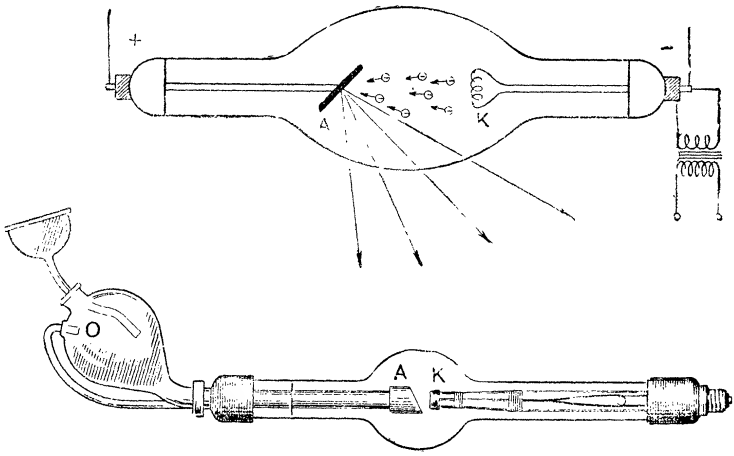


Рис. 323. Схематический рисунок рентгеновской трубки.

Действуя на газы, рентгеновские лучи способны вызвать их ионизацию. При облучении, например, рентгеновскими лучами воздуха, окружающего заряженный электроскоп, последний разряжается, какого бы знака заряд на нём ни был.

Рентгеновские лучи не отклоняются ни в электрическом, ни в магнитном поле. Это указывает на то, что рентгеновские лучи не являются движущимися электронами, как катодные лучи.

Рентгеновские лучи, как было установлено, представляют собой электромагнитные волны с очень малой длиной волны.

В настоящее время при помощи рентгеновских трубок получены лучи длиной волны в несколько сот ангстрем[1]. Удалось также получить очень короткие волны, в сотые доли ангстрема.

Рентгеновские лучи обладают большой проникающей способностью. Они легко проходят сквозь многие тела, непрозрачные в обычном смысле этого слова. Так, например, эти лучи без заметного ослабления проходят сквозь бумагу, картон, дерево, значительно хуже они проходят через металлы. Чем плотность вещества больше, тем оно менее проницаемо для рентгеновских лучей. Так, например, если рентгеновские лучи сравнительно легко проходят слой алюминия толщиной 5—10 *см*, то эти же лучи почти полностью задерживаются слоем свинца толщиной 1 *см*.

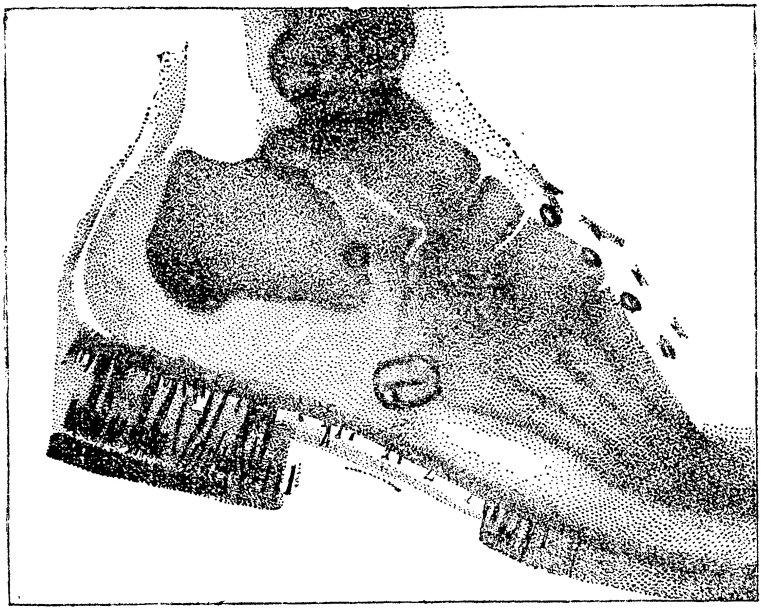


Рис. 324. Рентгенограмма ноги.

Свойство рентгеновских лучей проходить через вещество используется на практике уже со времени их открытия. В медицине многие болезни определяются просвечиванием человеческого тела рентгеновскими лучами. Эта область медицины получила название рентгенодиагностики. Просвечивание рентгеновскими лучами облегчает работу хирургов (исследование переломов, обнаружение пуль и осколков снарядов в теле раненого).

[1] Ангстрем (Å) — единица длины; 1 Å = 10^{-8} *см*.

На рисунке 324 показана фотография ступни человека, полученная при помощи рентгеновских лучей. Широкое распространение получила также и другая область медицины — рентгенотерапия, т. е. лечение болезней рентгеновскими лучами.

В металлургии часто применяются рентгеновские лучи для анализа однородности литья. При помощи их удаётся обнаруживать раковины и трещины внутри металлических изделий.

182. Электромагнитная природа света. По мере развития физики было установлено, что существует связь между оптическими и электромагнитными явлениями. Английский учёный Максвелл в 1865 г. теоретически доказал, что свет имеет электромагнитную природу.

Согласно теории Максвелла, свет от источника распространяется в виде электромагнитных волн.

Многочисленные эксперименты подтвердили это замечательное научное предвидение. Особенно важное значение в утверждении электромагнитной природы света имели экспериментальные работы немецкого учёного Герца и русского учёного Лебедева, которые на опытах доказали тождественность световых и электромагнитных волн.

С точки зрения электромагнитной теории видимый свет является лишь частным случаем электромагнитных волн. Различные виды этих волн отличаются друг от друга только частотой или длиной волны. В технике применяются радиоволны длиной от нескольких километров до нескольких миллиметров. Длины же волн видимого света находятся в пределах 0,8—0,4 *мк*.

Радиоволны, как известно, возникают при электромагнитных колебаниях в колебательных контурах. Уменьшая ёмкость и индуктивность контура, можно получать всё более и более короткие электромагнитные волны.

Естественно предположить, что и ***наиболее короткие волны, входящие в состав видимого света, возникают в результате электрических колебаний, происходящих в отдельных атомах тела.*** Опыт и теория полностью подтвердили эту гипотезу. Оказалось, что атомы излучают не только видимый свет; они являются источниками инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и других видов электромагнитного излучения. О том, как излучают атомы, будет рассказано дальше, в § 196.

В настоящее время весь широкий диапазон электромагнитных волн, начиная от длинных радиоволн и кончая наиболее короткими волнами, испускаемыми радиоактивными веществами, исследован на опыте.

Таким образом, в природе существуют электромагнитные волны самых различных длин. В зависимости от длины они обладают различными свойствами (видимость, цветность, проникающая способность и т. д.). Это является одним из ярких примеров того,

как от изменения количества (длины волны) изменяется и качество (их свойства).

Существующие в природе электромагнитные волны могут быть распределены по длинам в ряд, начиная от самых длинных до самых коротких, составляя так называемую шкалу электромагнитных волн.

В следующей таблице сведены все виды электромагнитных волн и дана их условная классификация.

	Длина волн в *см*
Радиоволны	$3 \cdot 10^{6}$—10^{-2}
Инфракрасные лучи	$3 \cdot 10^{-2}$—$7{,}6 \cdot 10^{-5}$
Световые волны, действующие на глаз	$7{,}6 \cdot 10^{-5}$—$4 \cdot 10^{-5}$
Ультрафиолетовые лучи	$4 \cdot 10^{-5}$—$6 \cdot 10^{-7}$
Рентгеновские лучи	10^{-6}—10^{-10}
Гамма-лучи	от 10^{-9} и короче

ГЛАВА X

ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

183. Фотоэффект. В 1887 г. немецкий учёный Герц открыл явление влияния света на электрический разряд. Изучая искровой разряд, Герц обнаружил, что если освещать отрицательный электрод ультрафиолетовыми лучами, то разряд наступает при меньшем напряжении на электродах.

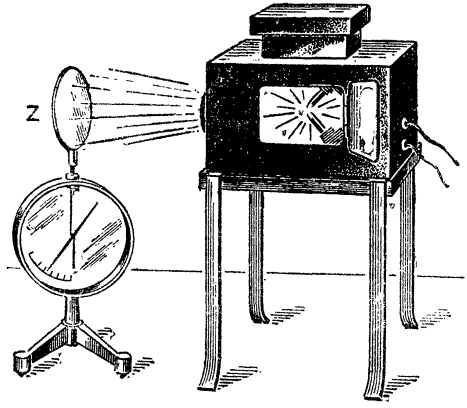


Рис. 325. Фотоэффект: под действием света металл теряет отрицательные заряды.

Далее было обнаружено, что при освещении светом электрической дуги отрицательно заряженной металлической пластинки Z (рис. 325), соединённой с электроскопом, стрелка электроскопа опускается. Это свидетельствовало о том, что освещаемая электрической дугой металлическая пластинка теряет свой отрицательный заряд. Положительный заряд металлическая пластинка при освещении не теряет.

Потеря металлическими телами отрицательного электрического заряда при освещении их лучами света получила название фотоэлектрического эффекта или просто фотоэффекта[1].

[1] Фотос (греч.) — свет; эффект (лат.) — действие.

В 1888 г. были начаты работы в области фотоэффекта знаменитым русским учёным А. Г. Столетовым.

Изучение фотоэффекта Столетов производил при помощи установки, схема которой изображена на рисунке 326, *а, б*.

Два небольших диска — сплошная цинковая пластинка *К* и тонкая сетка *А* — устанавливались вертикально друг против друга, образуя конденсатор. Пластинки конденсатора соединялись с полюсами источника тока, а затем освещались светом электрической дуги.

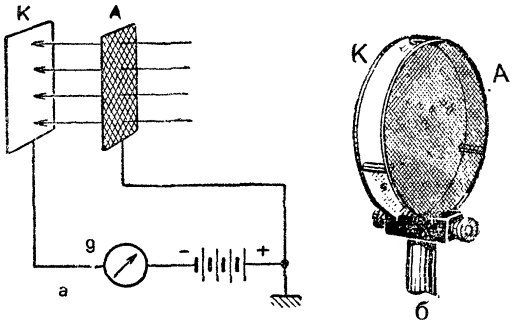


Рис. 326. *а* — схема установки Столетова по изучению фотоэффекта; *б* — прибор Столетова.

Свет свободно проникал через сетку и освещал поверхность сплошного цинкового диска.

Столетов установил, что если цинковая обкладка конденсатора соединена с отрицательным полюсом источника напряжения (является катодом), то гальванометр *g*, включённый в цепь, показывает ток. Если же катодом является сетка, то ток отсутствует. Значит, освещённая цинковая пластинка испускает отрицательно заряженные частички, которые и обусловливают существование тока в промежутке между ней и сеткой.

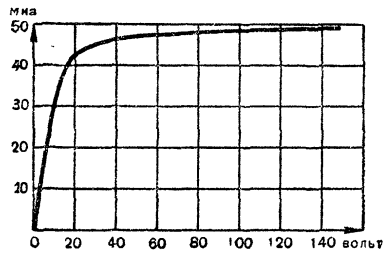


Рис. 327. График зависимости фототока от напряжения.

Столетов брал для своих опытов диски из самых различных металлов: алюминиевые, медные, цинковые, серебряные, никелевые. Присоединяя их к отрицательному полюсу источника напряжения, он наблюдал, как под действием света от электрической дуги в цепи его опытной установки возникал электрический ток. Такой ток называется фототоком.

При увеличении напряжения между обкладками конденсатора *К* и *А* фототок увеличивался, достигая при некотором напряжении своего максимального значения, называемого фототоком насыщения.

Зависимость между фототоком и напряжением показана на рисунке 327; при некотором напряжении фототок достигает своего максимального значения.

Исследуя зависимость фототока насыщения от величины светового потока, падающего на катодную пластинку, Столетов установил следующий закон:

величина фототока насыщения прямо пропорциональна падающему на металлическую пластинку световому потоку.

Этот закон носит название закона Столетова.

В дальнейшем было установлено, что фототок представляет собой поток электронов, вырванных светом из металла.

Явление фотоэффекта, как мы увидим дальше, нашло широкое практическое применение.

Столетов Александр Григорьевич (1839—1896) — знаменитый русский физик. Он открыл закономерности фотоэлектрических явлений, разработал метод исследования ферромагнетиков и установил вид кривой их намагничивания. Велики заслуги Столетова в развитии отечественной физики. Он воспитал целое поколение талантливых русских учёных, обогативших науку значительными открытиями.

184. Понятие о квантах. Согласно электромагнитной теории (§ 182), свет представляет собой электромагнитные волны. На волновые свойства света указывают такие явления, как интерференция и дифракция.

Однако целый ряд явлений, связанных с поглощением и излучением света веществом, не может быть объяснён на основе волновой теории. К числу таких явлений относится и фотоэффект.

Фотоэлектрический эффект, как уже указывалось, наблюдается при освещении любого металла. Но для каждого металла существует определённая длина световой волны, которая является так называемой «длинноволновой» границей фотоэлектрического эффекта. Свет, имеющий длину волны, большую граничной, не вызывает фотоэффекта, т. е. не вырывает ни одного электрона из данного металла. Так, например, если освещать цинковую пластинку лучами видимого света, то, какой бы величины ни был поток света, он не вырвет из цинка ни одного электрона. Но поток ультрафиолетовых лучей даже очень малой величины выбивает электроны из цинка.

Объяснить, почему при фотоэффекте свет с различной длиной волны по-разному действует на различные вещества, на основе волновой теории невозможно. Самым поразительным оказался тот факт, что энергия электрона, вырванного светом из металла, совершенно не зависит от величины светового потока, а зависит

только от длины световой волны. Будем ли мы освещать металл очень сильным или слабым светом данной длины волны, вылетающий из него электрон будет иметь одну и ту же энергию, следовательно, одну и ту же скорость. При этом оказывается, что с уменьшением длины волны энергия электронов, а значит, и их скорость возрастают.

Объяснение всем этим явлениям даёт квантовая теория, возникшая в конце XIX в. Основателем квантовой теории является немецкий учёный Планк.

Согласно квантовой теории, свет испускается и поглощается атомами или молекулами вещества не непрерывным потоком, но отдельными порциями вполне определённой величины. Эти отдельные порции света были названы квантами света [1] ***или фотонами*** [2]. Величина энергии фотона ε зависит от частоты света:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где буквой ν обозначается частота колебаний в световой волне, а h — постоянная Планка:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}.$$

Знаменитый учёный Эйнштейн, пользуясь представлением о фотонах, создал теорию фотоэффекта. Согласно этой теории, фотон, падая на металл, вырывает из него электрон. При этом энергия фотона $h\nu$ расходуется на работу P вырывания электрона из металла и на сообщение электрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$, т. е.

$$h\nu = P + \frac{mv^2}{2}. \qquad (1)$$

Если для некоторой частоты ν_0 окажется, что $h\nu_0 \leqslant P$, то $v = 0$ и явление фотоэффекта не будет иметь места.

Из сказанного следует, что для каждого вещества должна существовать своя особая частота, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Так, например, для цинка наименьшая частота, вызывающая фотоэффект, соответствует длине волны 370 *ммк*, для калия 450 *ммк*, для натрия 680 *ммк* и т. д.

Из формулы (1) видно, что кинетическая энергия вырванных электронов определяется лишь частотой падающего света; она не зависит от того, будет ли поток света большим или малым. Это как раз и соответствует тому, что наблюдается на опыте.

Теория световых квантов радикальным образом меняет существовавшие ранее взгляды на свойства света. Представление о свете, как только о волнах, недостаточно. Оно не отражает всех свойств света.

В таких явлениях, как фотоэффект, свет ведёт себя как поток особого рода частиц — фотонов; иначе говоря, обладает корпускулярными свойствами.

---

[1] Квант (от лат. квантум) — количество.

[2] Фотон (от греч. фотос — свет) — частица света.

Таким образом, имея электромагнитную природу, свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

185. Фотоэлементы. Приборы, в основе устройства которых лежит явление фотоэффекта, называются фотоэлементами.

На рисунке 328 изображён внешний вид современного фотоэлемента и схема устройства фотоэлемента.

Светочувствительный слой — катод — покрывает почти всю внутреннюю поверхность стеклянного баллона, за исключением небольшого окошечка для доступа света. Анод же представляет собой проволочное кольцо, укреплённое внутри баллона. В баллоне — вакуум [1].

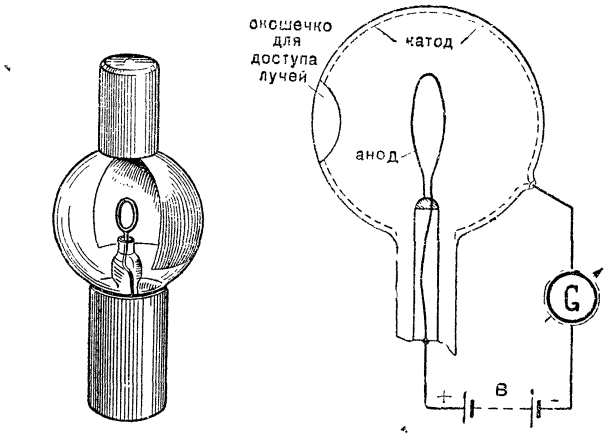


Рис. 328. Внешний вид фотоэлемента и схема устройства фотоэлемента.

Если соединить кольцо с положительным полюсом батареи B, а светочувствительный слой металла через гальванометр G с отрицательным её полюсом, то при освещении слоя надлежащим источником света в цепи появится ток.

Можно батарею выключить совсем, но и тогда мы будем наблюдать ток, только очень слабый, так как только ничтожная часть вырываемых светом электронов будет попадать на проволочное кольцо — анод. Чтобы заставить все вырванные светом электроны попасть в анод, достаточно приложить между анодом и катодом напряжение порядка 80—100 *в*.

Фотоэлектрический эффект можно наблюдать, используя любой металл. Однако большинство из них, такие, как медь, железо, платина, вольфрам, чувствительны только к ультрафиолетовым лучам. Одни лишь щелочные металлы — калий, натрий и особенно цезий — чувствительны и к видимым лучам. Они-то и применяются для изготовления катодов фотоэлементов.

[1] Имеются фотоэлементы, в которых баллон наполнен каким-нибудь инертным газом.

Основное техническое применение фотоэлементы находят в фототелеграфии (передача изображения на расстояние по проводам), в телевидении и в звуковом кино. Кроме того, фотоэлементы широко применяются в устройстве реле, имеющих назначение автоматически приводить в действие самые разнообразные механизмы. Такие реле носят название ф о т о р е л е.

Для примера рассмотрим применение фотоэлементов в качестве фотореле и в звуковом кино.

186. Фотореле. Фотореле называется прибор автоматического управления различными установками, использующий безынерционность фотоэффекта, т. е. способность фотоэлемента практи-

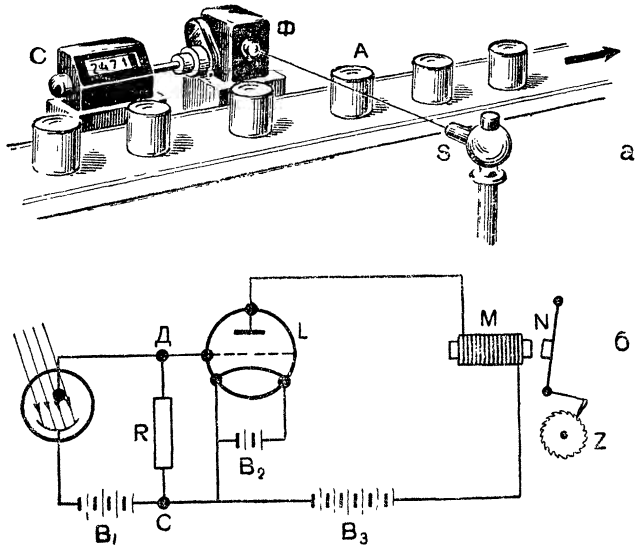


Рис. 329. *а* — фотореле в сочетании со счётным механизмом; *б* — схема устройства фотореле.

чески мгновенно реагировать на световое воздействие или его изменение. Представляя комбинацию фотоэлемента с электромагнитным реле, фотореле может иметь то или другое устройство в зависимости от типа фотоэлемента и от назначения самого фотореле.

Фотореле может работать либо при попадании света на элемент, либо при прекращении освещения фотоэлемента.

Необычайно разнообразны применения фотореле. Фотореле могут с успехом в нужное время включать и выключать уличные фонари в городах, свет маяков и бакенов, сортировать различные детали по цвету и форме, пускать в ход или останавливать электродвигатели и станки. На рисунке 329, *а* изображена установка для автоматического счёта изделий, движущихся на конвейере.

Узкий пучок лучей света от фонаря *S* (рис. 329, *а*) падает на фотоэлемент *Ф*; при этом счётный механизм *С*, подключённый к фотоэлементу, не работает. В момент, когда изделие *А*, движу-

щееся по конвейеру, прерывает пучок света, фотореле «срабатывает» и счётный механизм отмечает прошедшую деталь.

Схема устройства фотореле изображена на рисунке 329, *б*. При освещении катода фотоэлемента светом возникает фототок и на участке с сопротивлением R, включённым между сеткой и нитью накала — катодом, создаётся напряжение. Сетка лампы L, приключённая к одному из концов этого участка, получает отрицательный потенциал относительно катода, так как в цепи фототока потенциал точки $Д$ ниже потенциала точки C. Вследствие этого сетка препятствует электронам с катода попадать на анод. Лампа в таком положении «заперта». Когда же свет не попадает на фотоэлемент, лампа «открыта». В анодной цепи её, питаемой батареей B_3, возникает ток. Этот ток намагничивает включённый в анодную цепь электромагнит M, который, притягивая якорь N, поворачивает на один зубец колесо Z счётного механизма.

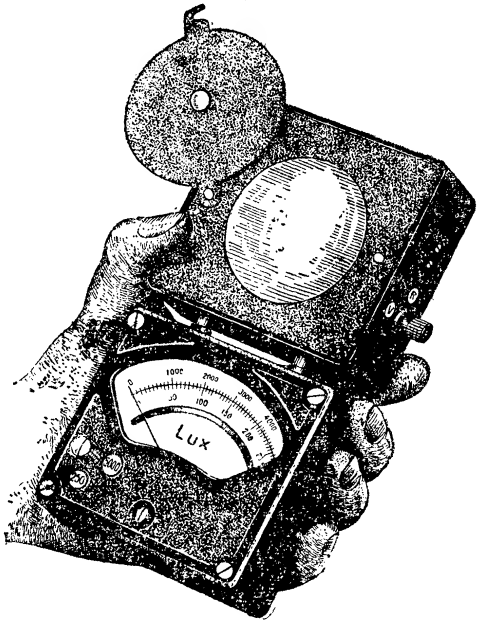


Рис. 330. Люксметр с фотоэлементом.

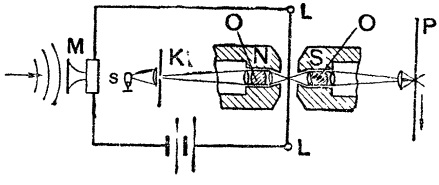


Рис. 331. Схема записи звука по системе Шорина.

На рисунке 330 изображён люксметр с фотоэлементом — прибор, измеряющий освещённость. В зависимости от освещённости в цепи фотоэлемента возникает различный ток, фиксируемый соединённым с фотоэлементом чувствительным гальванометром, показания которого проградуированы в люксах.

187. Запись и воспроизведение звука. Из всех разнообразных применений фотоэлемента в современной технике наиболее массовым является применение его в звуковом кино.

Существует несколько систем записи звука на плёнку. На рисунке 331 изображена упрощённая схема записи звука на плёнку по способу, разработанному профессором А. Ф. Шориным. Световые лучи от небольшой электрической лампочки S, пройдя через узкую щель K и специальный объектив O, падают в виде узенькой полоски на непрерывно движущуюся светочувствительную плёнку P. На пути лучей установлен особый прибор, назы-

ваемый модулятором света. Этот прибор использует колебания электрического тока для управления потоком света. Он представляет собой магнит, между полюсами которого натянута металлическая нить *LL*. Эта нить включена в электрическую цепь последовательно с микрофоном *M*. На микрофон воздействует звуковая волна.

Так как ток, проходящий через нить, изменяется в соответствии со звуковыми колебаниями, то нить колеблется между полюсами магнита в такт этим изменениям. При этом нить перекрывает путь свету то в большей, то в меньшей степени. В соответствии с этим и киноплёнка освещается то сильнее, то слабее.

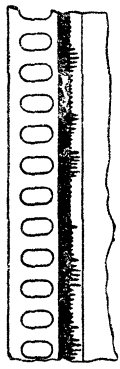


Рис. 332. Звуковая дорожка.

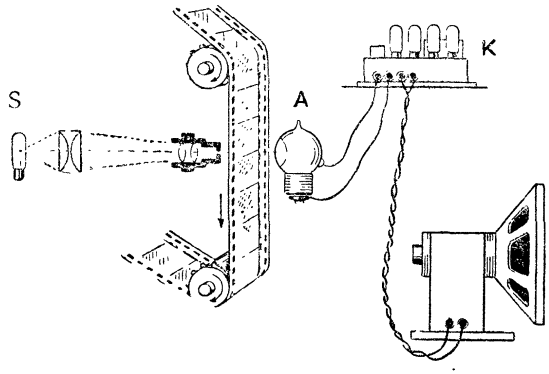


Рис. 333. Схема воспроизведения звука в кино.

Таким образом, на светочувствительном слое киноплёнки окажутся записанными малейшие изменения электрического тока, вызванные звуковыми колебаниями перед микрофоном.

«Звуковая дорожка», записанная по системе профессора Шорина, состоит из ряда поперечных непрозрачных штрихов различной длины (рис. 332).

Фотоэлемент в процессе записи звука на киноленту, как мы видим, не применяется.

Зато при воспроизведении звука с киноплёнки фотоэлемент совершенно необходим.

Схема воспроизведения звука в кино показана на рисунке 333. Постоянный по силе свет от лампы *S* собирается системой линз в узкий пучок, который падает на движущуюся киноленту. Проходя «звуковую дорожку» киноленты, световой поток меняется по величине в точном соответствии с колебаниями того светового потока, который действовал на плёнку при записи звука. В фотоэлементе *A* под действием этого светового потока возникает ток, который меняется в соответствии с изменением падающего на него света. Этот ток усиливается усилителем *K* и подаётся в громкоговоритель, установленный за экраном или рядом с ним.

В громкоговорителе колебания электрического тока обусловливают колебания механической системы, излучающей звук.

188. Люминесценция. Основными источниками света на Земле являются сильно накалённые тела. Такие источники света называются тепловыми. Но, кроме тепловых источников света, существуют источники холодного свечения, в которых световая энергия получается за счёт других видов энергии (например, химической).

Разнообразный круг явлений холодного свечения называется люминесценцией[1]. Разнообразны также и причины, возбуждающие люминесценцию.

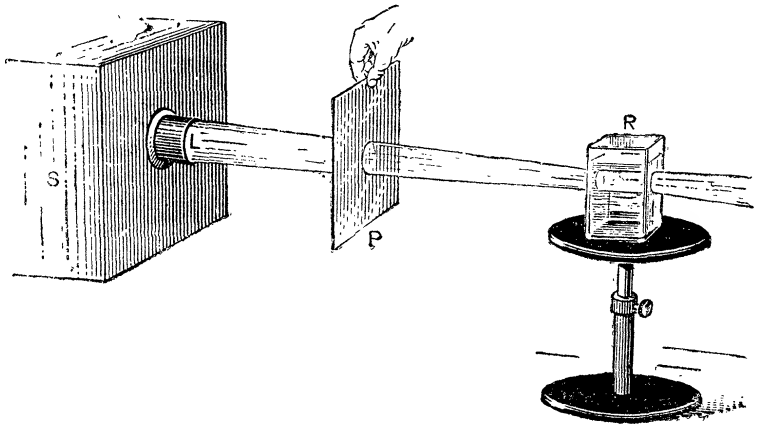


Рис. 334. Установка для опытов по люминесценции.

Свечение насекомых (например, светляков), древесных гнилушек, гниющего мяса и т. д., издавна известное человеку, является примером холодного свечения. Здесь свечение возникает при химических процессах, главным образом при окислении.

Если положить на наковальню небольшое количество жёлтых кристаллов соли азотнокислого урана и ударить по ним молотком, то в темноте можно заметить, что кристаллы при ударе вспыхивают красивым зелёным светом. Причиной холодного свечения кристалла в этом случае является механическое возбуждение его. Разлетающиеся в стороны при ударе осколки кристаллов продолжают ещё некоторое время светиться, что является весьма характерным для явления люминесценции.

Возбудителем «холодного света» может быть и сам свет. Помещая, например, на пути ультрафиолетовых лучей растворы различных органических красителей (родамина, флуоресцеина, эскулина), получаем яркое свечение (оранжевое, зелёное, синее и т. д.). Раствор флуоресцеина светится ярким зелёным светом и при освещении его пучком белых лучей света. Почти

[1] Люминесценция — от лат. люмен — свет.

бесцветный слой керосина в стеклянной посуде сбоку виден как голубоватый; зеленоватый на просвет раствор хлорофилла при рассмотрении сбоку представляется красным.

На рисунке 334 изображена установка для наблюдения люминесценции растворов при освещении их лучами света: S — источник света, L — линза, P — светофильтр, R — сосуд с исследуемым раствором.

Кристаллы азотнокислого урана и ряд других его соединений под действием света излучают яркий зелёный свет, точно такой же, какой они излучают при механическом возбуждении. Этот факт указывает на то, что во многих случаях характер люминесценции не зависит от способа её возбуждения. Но во всех случаях люминесценции, вызываемой освещением, люминесцентное излучение имеет другой спектральный состав, чем свет, которым производилось освещение.

Большое техническое применение получили в настоящее время особые неорганические составы, которые называются фосфорами. Они светятся как под действием света, так и под воздействием ионной и электронной бомбардировки в электрических газовых разрядах. Причём у фосфоров люминесценция длительно сохраняется и после прекращения действия возбудителя.

Сильно люминесцируют, например, кристаллы окиси цинка и двойной синеродистой соли платины и бария. Покрывая этими веществами листы картона, получают люминесцирующие экраны, применяемые, например, для наблюдения ультрафиолетовых и рентгеновских лучей.

189. Электрические лампы холодного свечения. Световая отдача современных ламп накаливания очень мала; в них только

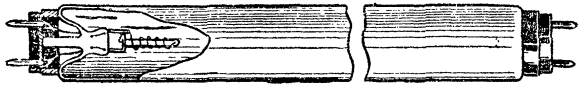


Рис. 335. Лампа дневного света.

3—4% энергии электрического тока превращается в световую энергию, остальная часть энергии тока идёт на нагревание. Электрическая лампа накаливания больше греет, чем светит. Значительно выгоднее в этом отношении лампы холодного свечения. В настоящее время разработаны разнообразные типы газосветных ламп. Эти лампы наполняются парами ртути или натрия. Для увеличения световой отдачи газосветных ламп и улучшения качества испускаемого ими света академик Вавилов предложил наносить на внутреннюю поверхность газосветной лампы люминесцирующие вещества (люминофоры, или светосоставы).

Люминофоры, поглощая свет одной спектральной области, дают свет, принадлежащий другой спектральной области. Особенно важное значение для светотехники имеют люминофоры,

превращающие энергию падающих на них ультрафиолетовых лучей в энергию видимого света. Описанные выше лампы называются люминесцентными лампами.

Путём специального подбора люминофоров удалось построить лампы дневного света, т. е. лампы, дающие свет, по своему спектральному составу тождественный с дневным солнечным светом. На рисунке 335 изображена лампа дневного света.

В то время как лампы накаливания на каждый ватт мощности дают световые потоки от 7 до 20 люменов, люминесцентные лампы на каждый ватт дают световые потоки от 30 до 60 люменов.

Будущее, несомненно, за газосветными лампами, которые со временем вытеснят малоэкономичные лампы накаливания.

190. Химическое действие света. Под действием света могут происходить весьма разнообразные химические реакции.

В некоторых случаях поглощение света вызывает разложение вещества; так, например, при освещении паров брома молекула брома распадается на два атома; нередко наблюдаются происходящие под действием света процессы окисления.

Реакции, вызываемые светом, называются фотохимическими реакциями.

При фотохимических реакциях элементарный процесс сводится к поглощению молекулой вещества фотона падающего света и химическому превращению молекулы, поглотившей свет.

Наиболее активными лучами являются лучи с короткой длиной волны: синие, фиолетовые и ультрафиолетовые; это и понятно, так как фотонам этого света соответствует большая величина энергии.

Иногда свет служит как бы толчком к началу процесса, вызывая первую его стадию, а затем этот процесс развивается самостоятельно. Смесь водорода и хлора в стеклянном сосуде в темноте может оставаться без изменения произвольно долго. Но стоит только выставить сосуд на солнечный свет, как происходит немедленное соединение обоих газов в хлористый водород, сопровождаемое взрывом. Здесь свет вызывает реакцию, подобно тому как упавшая на динамит искра вызывает его взрыв.

Длительное химическое действие света мы наблюдаем при выцветании красок, которое состоит чаще всего в окислении красящего вещества. При этом краски обесцвечиваются только в течение того времени, пока они подвергаются воздействию света.

Фотохимические реакции могут состоять и в разложении сложного вещества на составные части. Наиболее важная из подобного рода реакций — это разложение углекислого газа, поглощённого зелёными частями растений под действием солнечного света, на углерод и кислород. Это явление было детально изучено великим русским учёным К. А. Тимирязевым.

В техническом отношении наиболее важными фотохимическими реакциями являются реакции, происходящие в фоточувствительном слое фотопластинки или плёнки.

Ещё в 1839 г. было замечено, что металлическая пластинка, покрытая йодистым серебром, под влиянием света химически изменяется. Если на неё подействовать парами ртути, то ртуть осаждается в тех местах, где на пластинку действовал свет, и оставляет неизменёнными те места, на которые свет не действовал. При растворении в гипосульфите йодистого серебра на освещённых местах зеркальной пластинки получается белая ртутная амальгама. При рассмотрении такой пластинки под определённым углом можно видеть изображение предмета.

В современной фотографии светочувствительные пластинки делают из стекла или из целлулоида, на которые наносят слой бромосеребряной эмульсии в желатине. По высыхании этой эмульсии она получает очень большую светочувствительность. Современные способы фотографирования допускают, например, производство моментальных снимков на освещённых улицах ночью.

а б

Рис. 336. *а* — негатив; *б* — позитив.

Сухая бромосеребряная пластинка в темноте вставляется в фотоаппарат, и при помощи объектива на ней получают изображение предмета.

Если мы вынем пластинку в тёмной комнате, освещённой слабым красным светом, мало действующим на бромистое серебро, то никакого видимого изменения на ней мы не заметим. Но если поместить пластинку в раствор проявителя (гидрохинона, метола и др.), то заметим, что освещённые ранее светом места на пластинке чернеют. Чем ярче была освещена та или иная часть пластинки, тем более глубокое потемнение получается на этих местах. Неосвещённые места пластинки остаются неизменёнными — на них остаётся светлое бромистое серебро. При проявлении мы получаем негатив: светлые места негатива соответствуют тёмным местам снимка, и наоборот (рис. 336). Чтобы это изображение под действием света не изменялось, проявленный снимок закрепляют: пластинку опускают в раствор гипосульфита, в котором не восстановленное проявителем бромистое серебро растворяется. Негатив промывают и сушат.

С этого негатива можно получить сколько угодно позитивов. Для этого под негатив кладут лист бумаги с таким же светочувствительным слоем серебра того или иного состава и освещают негатив. При проявлении получают негатив негатива — позитив, т. е. изображение, в котором светлые места снимаемого

объекта получились светлыми и тёмные тёмными. Позитив, так же как и негатив, фиксируют, промывают и сушат. Позитивных процессов существует очень много. В некоторых из них получают при освещении негатива видимое изображение, не нуждающееся в дальнейшем проявлении.

Фотохимическая техника в настоящее время доведена до высокой степени совершенства. Можно получать снимки в натуральных цветах, можно фотографировать инфракрасными лучами в темноте.

191. Давление света. Наблюдая движение комет, учёные установили, что кометы движутся так, что хвосты их, состоящие из очень мелких частиц, всегда обращены от Солнца и увеличиваются по мере приближения кометы к Солнцу. Ещё Кеплер в 1619 г. пытался объяснить возникновение кометных хвостов давлением солнечных лучей.

Разработанная Максвеллом электромагнитная теория света утверждала, что световой поток, встречая поверхность какого-либо тела, должен производить на эту поверхность давление.

Многочисленные попытки подтвердить эти теоретические предсказания не увенчались успехом. Многие учёные просто не верили в возможность обнаружения светового давления. Однако русский физик П. Н. Лебедев преодолел все трудности и путём исключительно тонких и сложных опытов сумел обнаружить и измерить давление света сначала на твёрдые тела (в 1899 г.), а затем на газы (в 1909 г.).

Лебедев Пётр Николаевич (1866—1912) — знаменитый русский физик. Он впервые обнаружил и измерил давление света на твёрдые тела и газы. Получив миллиметровые электромагнитные волны, Лебедев доказал тождественность их свойств со свойствами световых лучей. Его экспериментальные исследования утвердили электромагнитную теорию света, содействовали раскрытию природы света. Лебедев был замечательным организатором коллективной научной работы. Он создал первую большую школу русских физиков, из которой вышли многие крупнейшие советские учёные.

Экспериментальное обнаружение давления света на газы подтвердило гипотезу Кеплера об отталкивании кометных хвостов солнечными лучами. После опытов Лебедева световое давление стали учитывать во всех теориях, касающихся космических процессов.

На рисунке 337 изображена схема установки, при помощи которой П. Н. Лебедеву удалось обнаружить и измерить световое давление на твёрдые тела.

Свет от электрической дуги B, проходя через целую систему линз и зеркал, падал на лёгкий диск R крутильных весов, подвешенных на тонкой нити в стеклянном баллоне, из которого был выкачан воздух. По величине поворота крутильных весов под действием светового пучка можно было судить о величине светового давления. Замечательно, что в этом опыте Лебедева световая энергия непосредственно превращается в механическую.

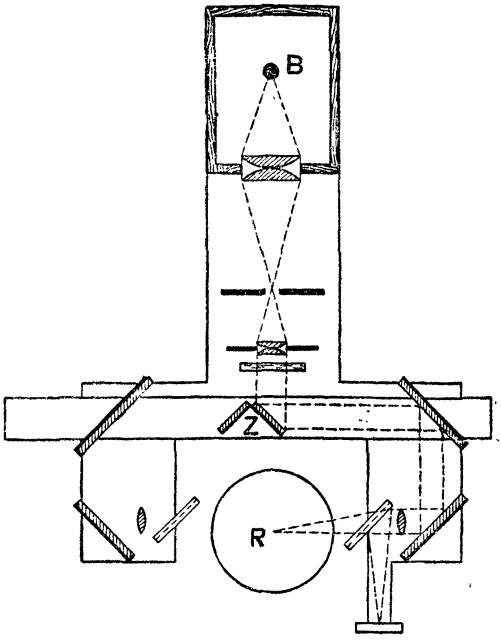


Рис. 337. Схема опыта Лебедева по измерению светового давления.

На рисунке 338 изображены различного вида измерительные устройства, которыми пользовался Лебедев в своих опытах.

При измерении светового давления на твёрдые тела Лебедеву пришлось преодолеть исключительные трудности. В чём состояли эти трудности?

Прежде всего при освещении небольших тонких дисков, подвешенных на тонкой нити, помимо сил светового давления, выступают так называемые радиометрические силы, которые в сотни тысяч раз превосходят по величине силы светового давления. Эти радиометрические силы обусловлены тем, что с освещённой стороны диск нагревается падающим светом, и поэтому обращённая к свету сторона диска теплее, чем та, которая остаётся в тени. Вследствие этого молекулы газа при попадании на диск будут отбрасываться молекулами нагретой стороны диска сильнее, чем противоположной, более холодной стороной. При отражении же молекулы газа от диска наблюдается явление «отдачи». Отдача будет сильнее на тёплой, освещённой стороне, чем на более холодной, не-

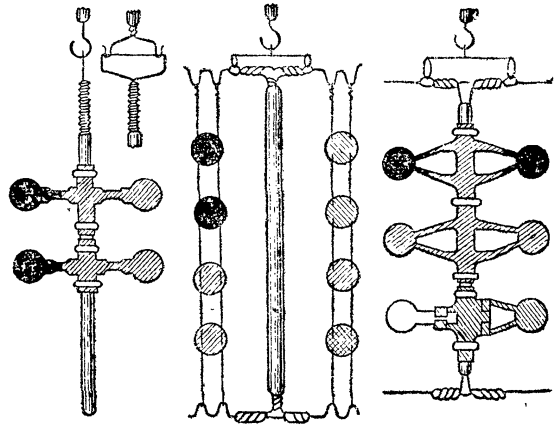


Рис 338. Детали установки Лебедева.

освещённой. В результате ударов множества молекул получается равнодействующая отдача, направленная в ту же сторону, в которую направлено искомое давление света.

Лебедеву пришлось предварительно тщательно изучить действие радиометрических сил. Выяснилось, что эти силы убывают по мере разрежения газа и по мере того, как диски делаются всё тоньше и тоньше. Возникла сложная для того времени проблема получения высокого вакуума, которую Лебедев успешно разрешил. Таким образом было уменьшено действие радиометрических сил.

Кроме радиометрических сил, на диски действовали ещё конвекционные силы, в десятки тысяч раз превышающие силы светового давления. Возникновение конвекционных сил обусловлено следующим. При нагревании диска падающими на него лучами одновременно нагреваются и прилегающие к нему слои газа; при этом образуется разность температур между газом у освещённой стороны и у теневой, что приводит к образованию конвекционных потоков. С увеличением вакуума в приборе эти силы также убывают. Лебедев исключал при измерениях конвекционные силы, заставляя лучи света одного и того же источника попеременно падать на диск то с одной, то с другой стороны, что достигалось передвижением зеркала Z, изображённого на схеме рисунка 337.

Таким образом, Лебедеву удалось до минимума уменьшить посторонние силы.

Опыты Лебедева показали, что: 1) падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности; 2) сила давления света прямо пропорциональна энергии падающего луча и не зависит от цвета.

Особенно важен тот факт, что Лебедев впервые показал, что свет, как и все тела природы, обладает массой.

Исследования Лебедева явились большим вкладом в решение глубочайшей научной проблемы — выявления природы света. Академик С. И. Вавилов указывал, что со времени открытия Лебедева «свет с полным основанием стал для физики одной из форм движущейся материи, и противопоставление света и материи навсегда исчезло в этом синтезе».

ГЛАВА XI

СТРОЕНИЕ АТОМА

192. Явления, подтверждающие сложность строения атома. Слово «атом» по-гречески означает неделимый. Древнегреческие учёные считали атомы неделимыми частицами, своеобразными «кирпичиками», из которых построены все тела природы.

Представление о неделимости атома удерживалось в физике почти до конца XIX века. Дальнейшее развитие физики в корне изменило это представление. Изучение электромагнитных явлений в конце XIX — начале XX века показало, что атомы вещества представляют сложные образования: они состоят из частиц, являющихся носителями положительного и отрицательного электричества. Из атома вещества удалось выделить сначала мельчайшие (элементарные) отрицательно заряженные частицы — электроны. Затем были обнаружены входящие в состав атомов элементарные положительно заряженные частицы — протоны.

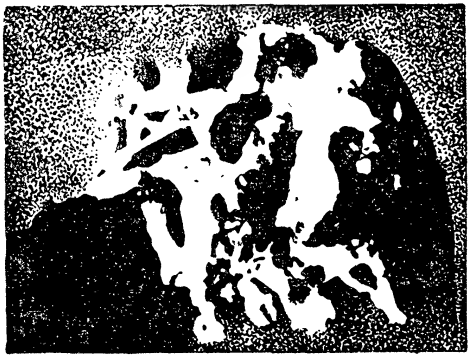


Рис. 339. Отпечаток куска урановой руды, полученный Беккерелем.

Особенно большое значение в развитии учения о строении атома имело исследование явления радиоактивности, открытого в конце XIX века французским учёным Беккерелем. Изучая явление люминесценции солей урана, Беккерель установил, что если осветить соль урана солнечными лучами, а затем положить её на завёрнутую в чёрную бумагу фотопластинку, то последняя темнеет под действием, как он полагал, лучей люминесценции.

Но однажды Беккерель положил на фотопластинку соль урана, не осветив её предварительно лучами солнца, и весь препарат поместил в тёмный ящик. Через несколько дней, проявив фотопластинку, он обнаружил на ней отпечаток куска урановой руды (рис. 339).

Проделав подобные опыты с разнообразными солями урана, Беккерель пришёл к выводу, что все соединения, содержащие уран, непрерывно излучают особые, как он их назвал, «урановые» лучи.

Оказалось, что вновь открытые лучи, подобно рентгеновским лучам, обладают способностью проходить сквозь различные вещества, в том числе сквозь тонкие металлические пластинки. Проходя через газы, «урановые» лучи ионизируют их. Кроме того, они возбуждают люминесценцию некоторых веществ (например, сернистого цинка, платино-синеродистого бария и др.).

Вскоре за этим открытием было установлено, что свойством испускать особые невидимые лучи, подобные «урановым», обладают также другие соединения. Вещества, испускающие эти лучи, назвали радиоактивными, а свойство вещества испускать такие лучи — радиоактивностью.

Всестороннее изучение радиоактивности было произведено Марией и Пьером Кюри. В 1898 г. им удалось выделить из урановой руды два радиоактивных элемента: полоний (Po) и радий (Ra).

Радий — редкий элемент: чтобы получить 1 *г* чистого радия, надо переработать не менее 5 *т* урановой руды.

Радиоактивность радия в несколько миллионов раз выше радиоактивности урана; уже одна десятимиллиардная доля грамма радия может быть обнаружена по его радиоактивным действиям.

В дальнейшем был открыт ещё целый ряд радиоактивных элементов.

Многочисленные опыты привели к выводу, что радиоактивность есть результат процессов, протекающих внутри атомов вещества. Таким образом, изучение электромагнитных явлений и явления радиоактивности дало возможность установить, что атом представляет собой сложную частицу, внутри которой происходят различные физические процессы. Возник вопрос: какова структура атома, из каких элементарных частиц он построен, как движутся эти частицы?

193. Виды радиоактивного излучения. Вскоре после открытия явления радиоактивности было установлено, что радиоактивные вещества испускают три вида лучей, отличающихся друг от друга неодинаковой способностью проникать сквозь вещества и рядом других свойств. Их назвали альфа (α)-лучами, бета (β)-лучами и гамма (γ)-лучами.

Эти три вида лучей можно разделить, действуя на радиоактивное излучение магнитным полем (на рис. 340 магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости чертежа); α-лучи и β-лучи отклоняются магнитным полем в противоположные стороны, а γ-лучи магнитным полем не отклоняются.

В курсе химии была уже рассмотрена природа этих трёх видов лучей, α-лучи являются потоком быстро движущихся

(со скоростью порядка $2 \cdot 10^9 \frac{см}{сек}$) частиц, каждая из которых заряжена двумя положительными элементарными зарядами и имеет массу, равную массе атома гелия (атомный вес гелия 4), т. е. α-частицы являются двукратно ионизированными атомами гелия. β-лучи представляют собой поток электронов, движущихся со скоростью, доходящей до 99% скорости света. Масса электронов много меньше массы α-частиц; поэтому в магнитном поле β-частицы отклоняются сильнее α-частиц. γ-лучи представляют собой очень короткие электромагнитные волны.

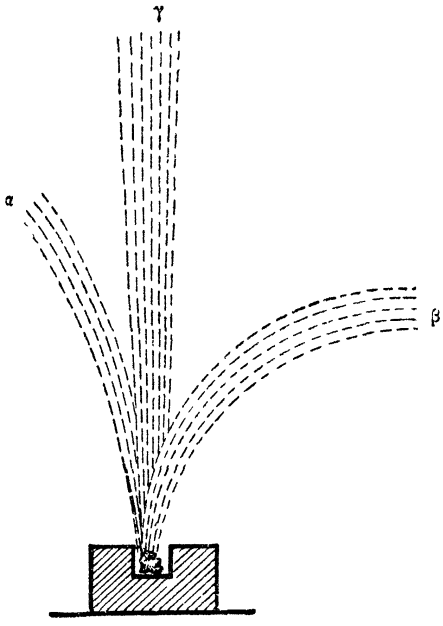


Рис. 340. Схема разделения радиоактивного излучения магнитным полем.

Частицы выбрасываются из радиоактивных веществ с огромными скоростями; следовательно, они обладают большой энергией.

В атомной физике энергию частиц принято выражать в особых единицах — электрон-вольтах (сокращённо: *эв*) или в миллионах электрон-вольт (*Мэв*).

Электрон-вольт есть энергия, равная работе, совершаемой при перемещении электрона между двумя точками электрического поля, при разности потенциалов между ними в один вольт.

Выразим электрон-вольт в эргах:

$$1\ эв = 4{,}8 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1}{300} = 1{,}6 \cdot 10^{-12}\ эрг.$$

Если выразить энергию α-частиц, получаемых при радиоактивном распаде, в электрон-вольтах, то она окажется в пределах от 4 *Мэв* до 9 *Мэв*.

194. Экспериментальные методы исследования частиц. Для обнаружения отдельных частиц и исследования взаимодействия их с веществом в распоряжении физиков в настоящее время имеются различные методы; рассмотрим некоторые из них.

а) Метод сцинтилляций (мерцаний). Опыт показывает, что если об экран, покрытый тонким слоем сернистого цинка, ударяется частица, то она вызывает на экране вспышку света, которую можно увидеть в лупу. По числу вспышек можно подсчитать, например, число α-частиц, испускаемых радиоактивным веществом в определённый промежуток времени. Наиболее

простое осуществление этот метод находит в спинтарископе Крукса (рис. 341).

Крупинка бромистого радия находится на кончике иглы A над экраном B из сернистого цинка. Если смотреть сквозь лупу C, предварительно подержав глаз в темноте, то в разных местах экрана можно обнаружить частые вспышки.

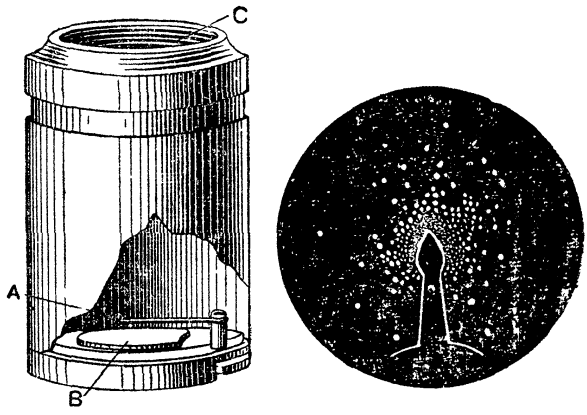


Рис. 341. Спинтарископ.

β-частицы наблюдать этим методом трудно, так как они, имея малую массу и обладая малой кинетической энергией, вызывают очень слабое свечение экрана.

б) Счётчик Гейгера. Регистрация частиц методом сцинтилляции не даёт необходимой точности: результат подсчёта вспышек на экране зависит от остроты зрения наблюдающего. Невозможным оказывается длительное наблюдение, так как глаз быстро утомляется. Значительно более совершенным прибором для регистрации частиц является так называемый счётчик Гейгера. Чтобы выяснить принцип действия такого счётчика, обратимся к рисунку 341а.

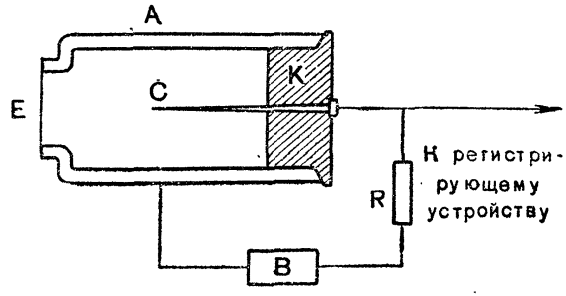


Рис. 341а. Схема счётчика Гейгера.

Металлический цилиндр A имеет с одной стороны крышку K из изолирующего материала, а с другой — окошко, плотно закрытое слюдяной пластинкой E. В крышку K вставлено металлическое остриё C, которое через сопротивление R приключается к источнику высокого постоянного напряжения B. Таким образом, между корпусом цилиндра A и остриём C возникает сильное электрическое поле.

Внутри цилиндра A находится разрежённый газ. Пока газ не ионизирован, ток в цепи источника B отсутствует. Допустим, что через окошко E внутрь цилиндра A влетает какая-либо частица, способная произвести ионизацию газа; тогда в электрическом поле между A и C окажутся ионы, которые создадут кратковременный электрический ток; последний может быть или непосред-

ственно отмечен прибором, или усилен и подан на какое-либо регистрирующее устройство. Так можно точно подсчитывать частицы, пролетающие в данном месте и в данном направлении, если эти частицы способны ионизировать газ.

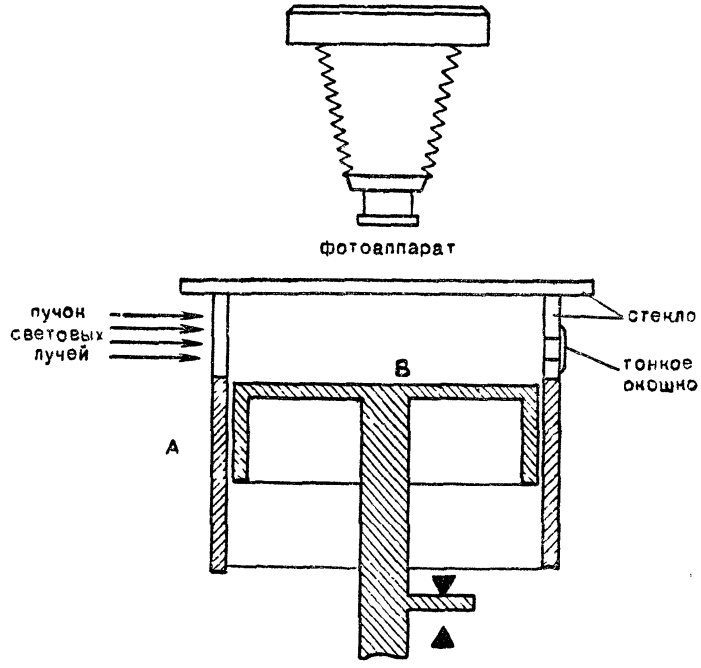


Рис. 342. Схема камеры Вильсона.

в) Камера Вильсона. Если в пространстве, содержащем пересыщенный пар, пролетит с большой скоростью частица, то она создаст на своём пути ионы. Эти ионы, как показывает опыт, становятся центрами конденсации, на которых водяной пар собирается в виде маленьких капелек. Вдоль всего пути частицы возникает тонкий след из капелек воды, который и даёт изображение этого пути.

Рис. 343. Следы α- и β-частиц в камере Вильсона.

Описанное явление положено в основу устройства одного из замечательных современных физических приборов — камеры Вильсона. Изображённая на рисунке 342 камера Вильсона состоит из цилиндрического сосуда *A*, верхние стенки которого сделаны из стекла; внутри цилиндра может двигаться поршень *B*. Камера содержит насыщающие пары воды или спирта.

При движении поршня вниз в камере образуется пересыщенный пар. Изучаемые частицы впускаются в камеру через тонкое окошечко.

Для фотографирования следов частиц камера сильно освещается.

На рисунке 343 воспроизведены фотографии следов α- и β-частиц. Нетрудно заметить, что оба типа следов резко отличаются друг от друга. След α-частицы жирный, след же β-частицы тонкий. Число капелек в следу α-частицы имеет величину порядка 10 000 на сантиметр. Следы же β-частиц имеют только около 100 капелек на сантиметр. Следовательно, α-частицы ионизируют газ сильнее β-частиц.

При помощи камеры Вильсона можно изучать любые частицы: измерять их массу, энергию, заряд.

195. Строение атома. Радиоактивные излучения в виде α-, β- и γ-лучей говорят о сложной структуре атома.

Изучение электромагнитных явлений (катодные лучи, термоэлектронная эмиссия, фотоэффект и др.) показало, что внутри атомов имеются электроны. Но электроны — отрицательно заряженные частицы, а в нормальном состоянии атом, как известно, нейтрален. Естественно было предположить, что внутри атома имеются положительно заряженные частицы, в сумме дающие такой же по величине заряд, как и все электроны.

Резерфорд Эрнест (1871—1937) — великий английский учёный. Его экспериментальные исследования в области атомной физики привели к раскрытию многих тайн строения и свойств атомов. Резерфорд открыл существование атомного ядра и создал планетарную модель атома. Им впервые осуществлено искусственное превращение элементов.

Перед учёными возникли важнейшие вопросы: как построен атом? Что представляют собой отдельные части атома? Как они взаимно расположены? Какова природа сил, связывающих отдельные части атома?

В результате многочисленных опытных и теоретических исследований была построена теория атома. Особенно важное значение для построения этой теории имели опыты Резерфорда по изучению прохождения α-частиц через тонкие металлические пластинки.

Основная идея этих опытов иллюстрируется рисунком 344.

Перед источником α-частиц R помещена диафрагма $Д$ с небольшим отверстием в центре; α-частицы, попадающие в отверстие, проходят через него в виде узкого пучка. В месте падения

пучка α-частиц на люминесцирующий экран *ЛЭ* образуется светящееся пятно, представляющее собой вспышки (сцинтилляции), возникающие под ударом каждой отдельной α-частицы. Так как число частиц, попадающих на экран за секунду, велико, то отдельные сцинтилляции сливаются для наблюдателя в светлое пятно.

Если поместить перед экраном тонкую плёнку *Р* из какого-нибудь вещества, например золотую фольгу толщиной примерно в 1 *мк* (микрон), то можно обнаружить, что интенсивность светя-

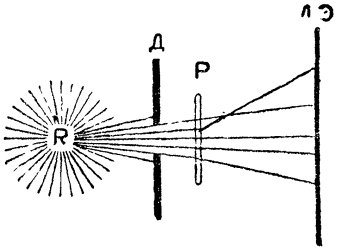


Рис. 344. Схема установки по рассеянию α-частиц.

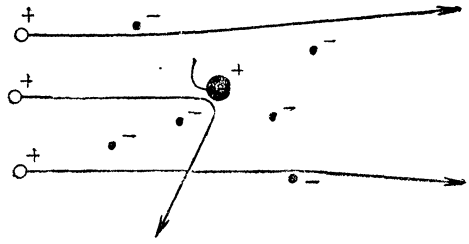


Рис. 345. Траектории α-частиц, пролетающих на разных расстояниях от атомного ядра.

щегося пятна немного уменьшается. В то же время появляется некоторое число сцинтилляций вне центрального пучка. Эти сцинтилляции вызваны α-частицами, которые при прохождении сквозь золотую фольгу изменили направление своего полёта, т. е. рассеялись. Подсчитывая число сцинтилляций в разных местах экрана в единицу времени, можно установить распределение в пространстве рассеянных α-частиц.

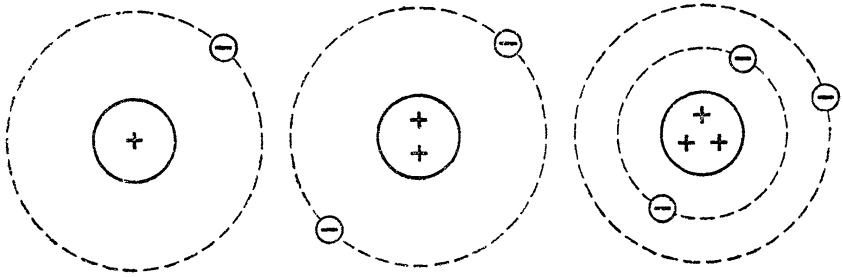


Рис. 346. Модели атомов водорода, гелия и лития.

Было обнаружено, что число α-частиц быстро убывает с увеличением угла рассеяния. Значит, большинство α-частиц проходит золотую фольгу, не отклоняясь от своего первоначального направления движения. Однако наблюдались немногие частицы, которые отклонялись на очень большие углы, а некоторые из них отклонялись почти на 180°.

Чем же объяснить рассеяние α-частиц при прохождении ими вещества? Вполне естественно предположить, что рассеяние α-частиц происходит вследствие воздействия на них частиц, из которых состоит вещество.

Так как масса α-частицы почти в 8000 раз превосходит массу электрона, то надо полагать, что изменение направления пути α-частиц при прохождении их через пластинку вызывается отнюдь не электронами, входящими в состав атомов пластинки.

Резерфорду удалось наблюдать случаи, когда отдельные α-частицы отклонялись на угол, больший прямого. Подобные случаи, очевидно, могли иметь место только тогда, когда α-частица близко подходила к положительно заряженной частице вещества и отбрасывалась последней назад (рис. 345).

Так как такие резкие отклонения α-частиц наблюдались весьма редко, то из этого факта Резерфорд вывел заключение, что лишь очень малая часть атома представляет препятствие для прохождения α-частицы.

Проанализировав результаты многочисленных опытов, Резерфорд в 1911 г. предложил следующую модель атома. Атом состоит из положительно заряженного ядра, которое занимает ничтожно малую часть всего объёма атома (диаметр ядра порядка $10^{-12} — 10^{-13}$ *см*); вокруг ядра расположены электроны.

Электроны вращаются вокруг ядра на относительно больших от него расстояниях. Совокупность этих электронов называют электронной оболочкой. Таким образом, атом представляется в виде планетной системы в маленьком масштабе (поэтому такую модель атома называют планетарной).

Изучая вопрос о величине заряда ядра, учёные установили, что ядра атомов различных веществ имеют положительный заряд, равный Ze, где e — величина заряда электрона, а Z — атомный номер элемента в периодической системе Менделеева.

Опыт показывает, что атом в целом нейтрален; следовательно, положительный заряд ядра должен быть нейтрализован равным ему отрицательным зарядом; отсюда ясно, что число электронов, вращающихся вокруг ядра, должно быть равно атомному номеру элемента. Например, у атома водорода вокруг ядра вращается 1 электрон, у гелия 2, у лития 3 и т. д. вплоть до урана, у которого вокруг ядра вращается 92 электрона.

На рисунке 346 изображены модели атомов водорода, гелия и лития.

Учитывая то обстоятельство, что число электронов в атоме сравнительно невелико (равно атомному номеру) и масса электрона меньше массы наиболее лёгкого атома — атома водорода — в 1840 раз, мы должны прийти к заключению, что практически вся масса атома сосредоточена в его ядре.

196. Развитие теории атома. Излучение и поглощение электромагнитных волн атомами. Наряду с опытами Резерфорда, установившими планетарную модель атома, в развитии теории атома чрезвычайно важную роль сыграло изучение вопроса об испускании и поглощении атомами электромагнитных волн.

В § 182 говорилось об электромагнитной природе света, о том, что источником световых волн являются атомы вещества. Как же

излучают атомы? Ответ на этот вопрос был получен после длительных поисков. Вначале на него отвечали следующим образом.

Поскольку в атоме отрицательно заряженный электрон движется по замкнутой орбите вокруг положительно заряженного ядра с ускорением (центростремительным), он создаёт переменное электромагнитное поле; поэтому атом является источником электромагнитных волн. Длина этих волн, или частота излучения, определяется частотой вращения электрона вокруг ядра.

Но электрон может вращаться вокруг ядра с любой частотой; поэтому следует ожидать, что в спектре излучения атомов данного вещества окажутся лучи всевозможных длин волн.

Согласно этой теории, если взять какой-либо газ — совокупность огромного числа атомов — и заставить его светиться (например, раскалив его), то спектр этого свечения должен получиться сплошным,— переход от одной частоты к другой должен быть непрерывным.

Однако такой ответ на вопрос о механизме излучения атома оказался неудовлетворительным. Опыт показывает совершенно иное.

Во-первых, спектр светящегося разрежённого газа оказывается не сплошным, а дискретным — образованным из отдельных линий. Во-вторых, частоты этих линий таковы, что их происхождение нельзя объяснить, пользуясь представлением об излучении как результате обращения электронов вокруг ядра.

Кроме того, изложенное выше представление обнаружило свою полную несостоятельность в решении вопроса об устойчивости атома.

Если электрон, двигаясь вокруг ядра, непрерывно излучает электромагнитные волны, то запас энергии атома должен непрерывно убывать. Действительно, с электромагнитным излучением уносится и энергия, последняя же черпается только из внутренних запасов энергии атома. По мере уменьшения энергии атома вращающийся электрон должен непрерывно приближаться к ядру и в конце концов на него упасть под действием электрической силы притяжения. Атом потеряет свою электронную оболочку, а вместе с ней и присущие ему физические и химические свойства.

Опыт же показывает, что атомы являются весьма устойчивыми системами.

Уже в начале XX века учёные пришли к выводу, что необходимы новые представления о механизме излучения и поглощения электромагнитных волн атомами. Прежде всего их требовало объяснение явления фотоэффекта (мы его рассматривали в § 183).

Опыт показал, что свет в ряде случаев нужно рассматривать как поток фотонов с энергией $h\nu$ (то же относится и к рентгеновским, и к γ-лучам). Как же появляются фотоны?

На этот вопрос также невозможно было ответить, пользуясь представлением о непрерывном излучении энергии электроном, вращающимся вокруг ядра.

В 1913 г. датский физик Нильс Бор выдвинул теорию, которая позволила дать ответ на поставленные выше вопросы.

Бор предположил, что атом может находиться в так называемых стационарных состояниях, когда он не излучает и не поглощает энергии. Электроны в атоме, который находится в одном из этих состояний, вращаются по стационарным орбитам и при этом не излучают электромагнитных волн.

Излучение и поглощение энергии вызываются переходом атома из одного стационарного состояния, например с энергией E_1, в другое — с энергией E_2, что соответствует переходу электрона с одной стационарной орбиты на другую. При таком переходе излучается или поглощается фотон, обладающий электромагнитной энергией, величина которой определяется соотношением:

$$h\nu = E_1 - E_2, \qquad (1)$$

где ν — частота электромагнитного излучения, h — постоянная Планка.

Воздействуя на атомы веществ светом, рентгеновскими лучами, потоком α-частиц или электронов, можно вызвать переход атома из одного стационарного состояния в другое. Такое изменение состояния атома называется возбуждением.

В возбуждённом состоянии атом пребывает недолго (миллиардные доли секунды); он возвращается в своё нормальное, невозбуждённое состояние, излучая фотон, частота которого определяется формулой (1).

На основании теории Бора можно также объяснить происхождение спектральных линий. Каждая спектральная линия получается в результате того, что атом испускает фотон при переходе из одного энергетического состояния в другое. При этом разность между энергиями атома в начальном и конечном состояниях определяет частоту электромагнитного излучения, а следовательно, и положение данной линии в спектре.

Существование дискретных энергетических состояний атомов является одной из самых характерных особенностей их свойств; оно доказано многочисленными опытами.

Вопрос о том, как связаны энергетические состояния атома со структурой атома, с взаимным расположением составляющих его частиц, является большой научной проблемой, которую пристально изучает атомная физика.

Дальнейшее развитие теория атома находит в настоящее время в квантовой механике. Квантовая механика показала, что в мире атомов и молекул — так называемом микромире — имеют место закономерности, которые отличаются от закономерностей макромира — мира непосредственно наблюдаемых нами тел.

197. Изотопы. Большую роль в развитии физики атома сыграло открытие изотопов — элементов, занимающих одно и то же место в периодической системе Менделеева.

Атомные веса изотопов, получившихся в результате радиоактивного распада веществ, как показывают измерения, выражаются целыми числами. Так, например, атомный вес изотопа свинца, найденного в урановой руде, равен 206, в актиниевой руде 207, а в ториевой руде 208, вдали же от радиоактивных руд свинец встречается с атомным весом 207,2. Вполне естественно было предположить, что «обычный» свинец представляет собой смесь изотопов свинца, и опыт подтвердил это предположение.

Далее было установлено, что атомные веса изотопов всех элементов, в том числе и нерадиоактивных, выражаются целыми числами. Как же объяснить тот факт, что атомные веса многих элементов не выражаются целыми числами? Это легко понять на следующем примере.

У хлора два изотопа с атомными весами 35 и 37, с относительным содержанием в 75% и 25%; отсюда и получается средний атомный вес хлора равным:

$$(35 \cdot 0{,}75) + (37 \cdot 0{,}25) = 35{,}5.$$

Изотопы имеются почти у всех элементов, например кислород имеет три изотопа с атомными весами 16, 17 и 18; у азота два изотопа с атомными весами 14 и 15, а у олова даже 11 изотопов.

Особый интерес представляет тяжёлый изотоп водорода, так называемый дейтерий (химический знак D). Масса его атомов почти в два раза больше, чем у атомов основного изотопа водорода. Ядро тяжёлого водорода называется дейтоном (или дейтроном).

Вода, в молекулах которой обычный водород заменён дейтерием, получила название тяжёлой воды (D_2O). Она заметно отличается от обычной воды по своим физиологическим и биохимическим свойствам и в значительной степени по своим химическим и физическим свойствам.

Так, например, плотность тяжёлой воды на 12% больше плотности обычной воды. Замерзает тяжёлая вода при 3,8° С, кипит при 101,4° С (при нормальном атмосферном давлении).

На многие живые организмы тяжёлая вода оказывает гибельное действие.

198. Массовое число. Обозначение ядер. В атомной физике величины масс атомных ядер выражаются в относительных единицах; они рассчитываются по отношению к массе атома изотопа кислорода, которую принимают равной 16. Масса атомов лёгкого водорода по отношению к этой массе равна 1,008, гелия 4,003, лития 6,940 и т. д.

Ближайшее к значению атомного веса изотопа целое число носит название массового числа.

Ядро условились обозначать химическим символом атома, которому оно принадлежит, с двумя индексами: верхним и нижним. Верхний индекс обозначает массовое число, а нижний

индекс — заряд (порядковый номер в периодической системе). Так, например, символы $_1H^1$, $_8O^{16}$, $_6C^{12}$, $_7N^{14}$ изображают ядра изотопов водорода, кислорода, углерода и азота с массами соответственно: 1, 16, 12, 14 и зарядами: 1, 8, 6, 7.

199. Искусственное превращение элементов. Когда атом излучает или поглощает электромагнитные волны, он не изменяет своих химических свойств, он сохраняет свою индивидуальность. Возможно ли заставить атом изменить свои свойства, возможно ли один элемент превратить в другой? Эту многовековую мечту алхимиков — искусственное превращение элементов — впервые осуществил в 1919 г. Резерфорд. Схема установки, с помощью которой было осуществлено первое превращение элементов, изображена на рисунке 347.

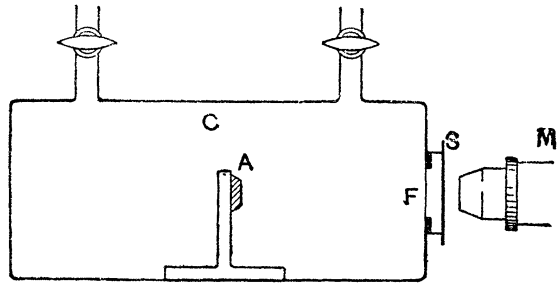


Рис. 347. Схема установки Резерфорда по расщеплению ядер азота.

В камере *C* находится радиоактивное вещество *A*, испускающее α-частицы. Эти частицы, падая на экран *S*, вызывают сцинтилляции, наблюдаемые с помощью микроскопа *M*. Перед экраном помещается металлическая пластинка *F* такой толщины, чтобы α-частицы не могли проникнуть сквозь неё и вызвать сцинтилляцию экрана *S*.

Оказалось, что если камеру *C* наполнить кислородом, то при наличии пластинки *F* сцинтилляции на экране не возникали; если же кислород заменить азотом, то обнаруживались сцинтилляции. Какие частицы их вызывали? Резерфорд предположил, что сцинтилляции вызываются частицами, которые испускаются ядрами азота в результате бомбардировки их α-частицами.

Опыты по отклонению этих частиц в магнитном поле показали, что они имеют положительный заряд; измерение же их массы позволило установить, что они являются ядрами водорода, или протонами. Появление протонов в камере *C* Резерфорд объяснил тем, что при обстреле атомов азота α-частицами некоторые из α-частиц проникают в ядра азота и выбивают из них протоны; последние, обладая огромной скоростью, проникают через пластинку *F* и вызывают сцинтилляцию экрана.

Таким образом, в этом явлении имеет место процесс превращения ядер, который можно представить себе состоящим из двух этапов. Первый этап заключается в захвате ядром азота α-частицы с образованием неустойчивого ядра, которое во втором этапе распадается на две частицы, одна из которых — протон.

Когда ядро азота поглощает α-частицу, то образуется новое ядро с массовым числом 14+4=18 и зарядом 7+2=9. Это ядро неустойчивого изотопа фтора.

Во втором этапе сложное ядро распадается на две частицы, одна из которых является протоном с массой 1 и зарядом 1. Масса другой частицы (18—1) = 17 и заряд её (9—1) = 8, что соответствует изотопу кислорода.

Рассмотренную ядерную реакцию можно записать в виде следующей формулы:

$$_2He^4 + _7N^{14} \rightarrow (_9F^{18}) \rightarrow _8O^{17} + _1H^1.$$

Обычно описанную реакцию изображают, опуская промежуточное ядро ($_9F^{18}$):

$$_2He^4 + _7N^{14} \rightarrow _8O^{17} + _1H^1.$$

Таким образом, по существу из атомов азота и гелия получаются атомы кислорода и водорода. Эта замечательная реакция представляет собой не что иное, как явление превращения одного элемента в другой.

Кроме азота, путём облучения α-частицами удалось осуществить

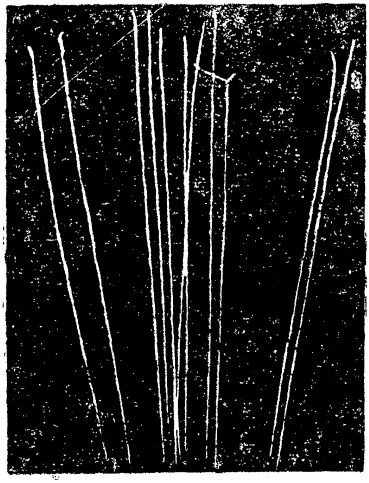


Рис. 348. Рисунок с фотографии, показывающей результат столкновения α-частицы с ядром атома азота.

Рис. 349. Рисунок с фотографии следов α-частиц, получившихся при расщеплении лития.

превращение ядер атомов многих других элементов: бора, фтора, натрия, фосфора, алюминия и др.

О превращении ядер одних элементов в ядра других можно судить по характеру следов, оставляемых частицами при их движении в камере Вильсона: α-частицы оставляют характерные следы в виде толстых прямых линий; протоны оставляют более тонкие следы. Если частица движется, не сталкиваясь с другими частицами, то её след будет представлять почти прямую линию. Если же происходит столкновение, то след частицы обнаруживает излом, как это видно на рисунке 348. Каждый из таких следов подобен вилке, состоящей из двух ветвей. По этой фотографии можно заключить, что в точке разветвления следа α-частица ударила в ядро, в результате чего появился протон (тонкий след) и новое ядро (толстый след).

Изучение следов частиц, образовавшихся в результате ядерных реакций, привело к открытию новой частицы — позитрона, масса которого равна массе электрона, а заряд положительный, равный заряду электрона. Обозначение позитрона: β^+.

Необходимо отметить, что столкновение α-частицы с ядром атома — явление довольно редкое. Так, например, из 500 тысяч сфотографированных следов α-частиц в опытах Резерфорда только в 8 случаях были обнаружены вилки. Следовательно, в среднем примерно из 60 000 α-частиц только одна выбивала протон из ядра азота.

Жолио-Кюри Фредерик (1900—1958 гг.) — выдающийся французский учёный. Он открыл явление искусственной радиоактивности, получив в результате ядерных реакций изотопы ряда элементов, обладающие радиоактивными свойствами. Велики его заслуги в изучении атомной энергии и возможности её практического использования. Жолио-Кюри являлся неутомимым борцом за мир, против использования атомной энергии в военных целях.

Превращение атомов достигается не только облучением их α-частицами. Можно, например, применить для этой цели протон, сообщив ему энергию, достаточную для того, чтобы при столкновении с ядром элемента он мог его разрушить. Таким путём, например, удалось превратить литий в гелий. Эта ядерная реакция записывается следующим образом:

$$_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow 2{}_2He^4,$$

где $2{}_2He^4$ означает два ядра гелия (две α-частицы). На рисунке 349 показана фотография следов α-частиц, получающихся при расщеплении лития под действием протонов.

Одной из интересных и очень важных ядерных реакций является реакция, возникающая при бомбардировке дейтронами тяжёлого водорода, т. е. дейтронов же. При этом наблюдается реакция:

$$_1D^2 + {}_1D^2 \rightarrow {}_1H^3 + {}_1H^1.$$

Продукт этой реакции изотоп $_1H^3$ называется сверхтяжёлым водородом или тритием. Тритий, содержащий избыток нейтронов, радиоактивен. Он превращается с испусканием β-частицы в лёгкий гелий $_2He^3$:

$$_1H^3 \rightarrow {}_2He^3 + \beta^-.$$

Для превращения ядер необходимо иметь «ядерные снаряды» — частицы с очень большой энергией. Удобный источник частиц с большой энергией даёт нам сама природа в виде естественных α-лучей. Однако излучение, создаваемое даже наиболее сильными радиоактивными препаратами, не даёт возможности осущест-

вить ядерные реакции в достаточно большом масштабе. Для этого нужны более мощные источники излучения.

Для управления ядерными превращениями, вызова по желанию той или другой ядерной реакции, кроме α-частиц, используются протоны, дейтроны и другие частицы. Существуют установки, которые дают возможность получить эти «ядерные снаряды» в достаточном числе и с большой энергией.

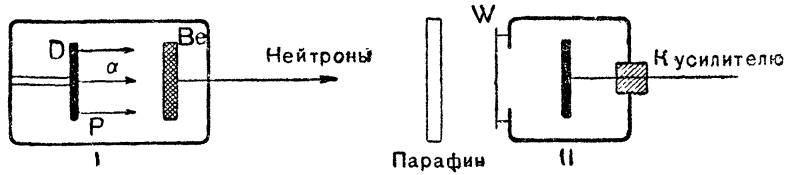


Рис. 350. Схема установки, при помощи которой были открыты нейтроны.

200. Нейтрон. При облучении α-частицами ряда лёгких элементов, в частности бериллия, было замечено, что вещество, подвергнутое облучению, становится источником какого-то особого излучения слабой интенсивности, но огромной проникающей способности.

Исследования показали, что это излучение представляет собой поток частиц, не имеющих заряда. Частицы эти были названы нейтронами.

Рис. 351. Следы протонов, выбитых нейтроном из водорода.

На рисунке 350 показана схема установки для обнаружения нейтронов и изучения их свойств.

В камере *I*, из которой выкачан воздух, помещается диск *D*, на поверхности которого осаждён радиоактивный элемент полоний (Po), являющийся источником α-частиц.

Пластинка бериллия (Be) служит мишенью для α-частиц. При бомбардировке бериллия α-частицами выделяются нейтроны; проходя тонкую стенку камеры, они проникают в счётчик *II* через окошечко *W*.

Результаты опытов показывают, что, когда вылетающие из бериллия нейтроны непосредственно попадают в счётчик, в минуту регистрируется несколько частиц. При помещении тонкого слоя свинца перед ионизационной камерой число регистрируемых частиц не изменяется сколько-нибудь заметно. Однако если перед окошком поместить тонкую пластинку парафина (рис. 350), то число частиц заметно возрастёт. Это возрастание объясняется следующим образом.

Парафин содержит в большом количестве атомы водорода, масса которых близка к массе нейтронов. Проходя через парафин, нейтроны сталкиваются с ядрами атомов водорода (прото-

нами) и передают им значительную часть своей энергии. В результате из парафина выбиваются протоны; последние проникают в ионизационную камеру (счётчик) и регистрируются в ней.

Итак, в отличие от заряженных частичек (протонов, электронов, α-частиц) нейтроны при прохождении через вещество не теряют своей энергии на ионизацию атомов этого вещества. Этим объясняется огромная проникающая способность нейтронов.

По той же причине нельзя непосредственно обнаружить нейтроны в камере Вильсона. Но если нейтрон столкнётся с ядром атома, например с протоном, то последний при этом получит большую кинетическую энергию, а значит, и способность ионизировать атомы. Таким способом и был обнаружен нейтрон, а именно по действию выбитых им ядер элементов. Если сам он и не оставляет следа, то протон, получившийся в результате столкновения его, например, с ядром атома водорода, оставляет ионный след в камере Вильсона (рис. 351).

Точные измерения показали, что масса нейтрона очень близка к массе протона. Следовательно, нейтрон можно рассматривать как частицу с массовым числом 1 и с зарядом 0. Нейтрон принято изображать символом ${}_0n^1$.

Ядерную реакцию, вызывающую появление нейтрона при встрече α-частицы с ядром бериллия, можно записать в следующем виде:

$$ {}_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1. $$

Нейтроны в свою очередь могут быть использованы для превращения элементов; и действительно, вскоре после их открытия удалось наблюдать, например, такую реакцию:

$$ {}_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_5B^{11} + {}_2He^4. $$

Таким образом, открытие нейтронов дало в руки исследователей новое могучее орудие воздействия на ядра атомов.

201. Строение атомных ядер. Внутриядерная энергия. Явление радиоактивности и искусственное превращение элементов ясно указывают на то, что атомное ядро построено из некоторого числа частиц.

Самый лёгкий элемент — водород — состоит, как мы видели, из одного электрона и одного протона. Ядром атома водорода, таким образом, является протон. Из каких же частиц состоят ядра других атомов? Какова структура ядра?

Советские учёные Д. Д. Иваненко и Е. Д. Гапон высказали гипотезу о том, что ядра всех элементов состоят из протонов и нейтронов. Масса ядра равна сумме масс протонов и нейтронов [1]. Заряд же ядра обусловлен только протонами, так как нейтрон электрически нейтрален.

---

[1] Строго говоря, масса ядра не вполне точно равна сумме масс протонов и нейтронов.

Зная массовое число и порядковый номер изотопа элемента, можно определить число протонов и число нейтронов в ядрах этого элемента.

Так, например, массовое число серебра 108, а порядковый номер его 47, это значит, что в ядре атома серебра содержится 47 протонов и 108—47=61 нейтрон.

Если Z — порядковый номер элемента (который указывает число протонов в ядре), M — массовое число его, а N — число нейтронов в ядре, то можно написать следующее равенство:

$$M=Z+N.$$

Так как изотопы одного и того же элемента имеют одинаковый порядковый номер, но различные массовые числа, то это значит, что ядра атомов их имеют одинаковое число протонов, но различное число нейтронов.

Одним из важнейших вопросов учения о строении ядер является вопрос о природе сил, которые связывают частицы в ядре. О наличии этих сил говорит нам устойчивость ядер нерадиоактивных элементов.

Что же это за силы? Поскольку ядра состоят из протонов и нейтронов, эти силы не могут быть обычными силами электрического взаимодействия. Больше того, между протонами действуют отталкивающие электрические силы. Ясно также, что эти силы не являются и силами тяготения, так как силы тяготения между частицами со столь малыми массами, как протон и нейтрон, ничтожно малы и вряд ли могут играть в ядерных процессах какую-нибудь заметную роль.

Естественно допустить, что главные силы, действующие между ядерными частицами, имеют какой-то иной характер. Природа этих сил довольно сложная, их принято называть ядерными силами.

Ядерные силы очень быстро уменьшаются при увеличении расстояния между частицами, и они действуют лишь в самом ядре и в непосредственной близости от него. Между нейтронами, а также между протоном и нейтроном действуют только лишь ядерные силы. Между протонами, помимо ядерных сил, действуют ещё электрические силы отталкивания. На очень малых расстояниях действие ядерных сил значительно превышает действие электрических сил.

Самой характерной особенностью атомных ядер является то, что у них очень велика энергия взаимодействия частиц, составляющих ядро. Эта энергия называется внутриядерной или атомной энергией.

Установлено, что в равных количествах вещества запасы атомной энергии превышают запасы химической энергии примерно в миллион раз.

В настоящее время учёным удалось найти способы использования внутриядерной энергии для практических целей.

202. Деление ядра урана. Цепная ядерная реакция. В 1939 г. было установлено, что при облучении урана нейтронами образуется новое неустойчивое ядро урана, которое расщепляется на два ядра с приблизительно равными массами.

Такой вид ядерной реакции, при которой тяжёлое ядро расщепляется на два ядра-осколка примерно равной массы, называется ядерной реакцией деления.

Опыт показывает, что ядра-осколки, образовавшиеся при делении ядра урана, разлетаются в стороны с громадными скоростями — происходит своеобразный взрыв атомного ядра, сопровождающийся интенсивным γ-излучением. Следовательно, при

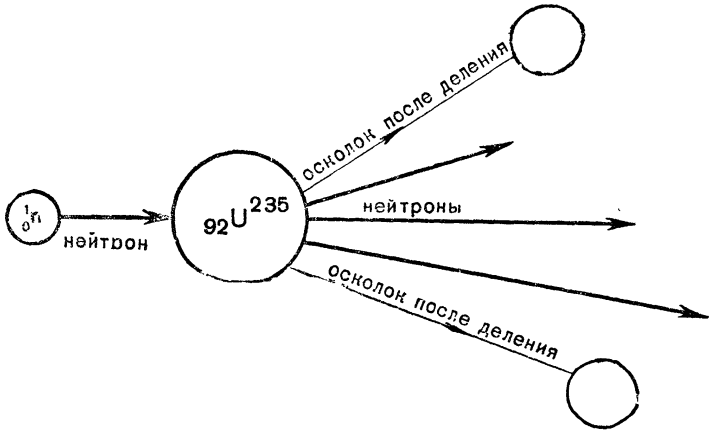


Рис. 352. Схема образования нейтронов при делении ядра урана.

делении ядер урана происходит превращение ядерной энергии в кинетическую энергию разлетающихся осколков и в энергию излучения.

Энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана, равна примерно 200 *Мэв*. Подсчитано, что если бы произошёл распад ядер всех атомов 1 *кг* урана, то он сопровождался бы выделением энергии в таком же количестве, как и при сгорании 2000 тонн угля, или при взрыве 20 000 тонн тринитротолуола.

Осколки ядра урана являются радиоактивными и испытывают ряд последовательных превращений, в свою очередь сопровождающихся выделением энергии. Было обнаружено, что при распаде ядер урана образуются многие элементы, например барий, криптон, рубидий, кадмий и др.

Самая замечательная особенность ядерной реакции деления состоит в том, что она сопровождается самопроизвольным (спонтанным) испусканием нейтронов. Как показали исследования, на одно разделившееся ядро приходится несколько (от 1 до 3) нейтронов (рис. 352).

Этот факт играет решающую роль в использовании внутриядерной энергии. Если при делении ядра урана, кроме двух новых ядер, образуется ещё 1—3 нейтрона, то эти нейтроны в свою

очередь могут быть захвачены другими ядрами урана, которые при этом делятся, образуя теперь уже удвоенное количество новых нейтронов; последние могут вызвать дальнейшие деления.

Количество нейтронов, а вместе с ними количество делящихся ядер непрерывно растёт. Вместе с тем растёт и количество выделяемой энергии, которое может достигнуть огромной величины. Весь этот процесс протекает очень быстро.

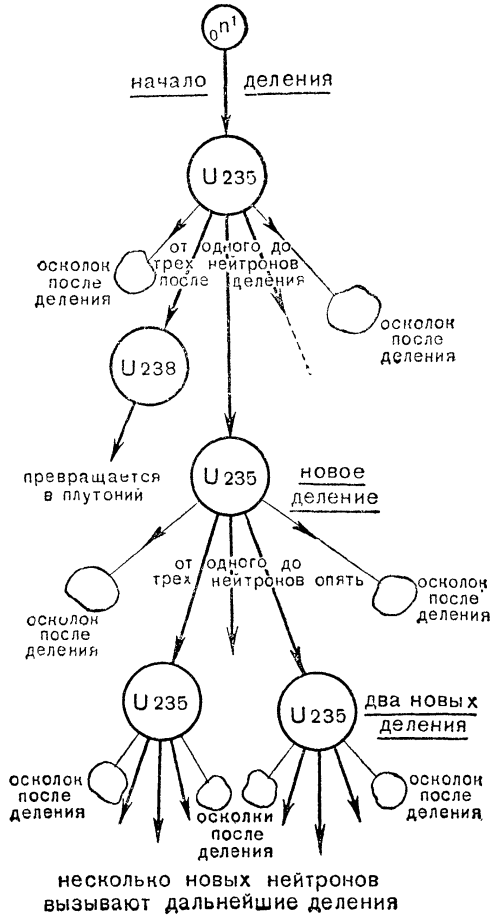


Рис. 353. Схема цепной ядерной реакции.

Описанная выше ядерная реакция называется цепной реакцией. Схема такой реакции изображена на рисунке 353.

Так как в цепной реакции процессы деления ядер происходят чрезвычайно быстро, практически мгновенно, то выделение огромного количества энергии при некоторых условиях происходит как взрыв огромной силы.

Однако практическое осуществление ядерной цепной реакции взрывного вида возможно лишь при определённых условиях.

Дело в том, что природный уран состоит в основном из двух изотопов: 99,3% $_{92}U^{238}$ и 0,7% $_{92}U^{235}$. Причём оказалось, что цепная реакция возможна только при делении ядер изотопа $_{92}U^{235}$.

Изотоп же $_{92}U^{238}$ только поглощает нейтроны, точно так же как поглощают нейтроны и всякие посторонние примеси в уране, препятствуя развитию ядерной цепной реакции.

Следовательно, для образования цепной ядерной реакции необходимо из природного урана выделить в чистом виде изотоп $_{92}U^{235}$. Отделение же этого изотопа представляет собой задачу хотя практически и решённую, но крайне трудную.

Кроме $_{92}U^{235}$, ядерная цепная реакция может развиваться в куске металла плутония. Плутоний $_{94}Pu^{239}$ в природных земных условиях не встречается, его получают из урана в особых установках, называемых урановыми котлами.

Использование плутония вместо $_{92}U^{235}$ выгодно потому, что

плутоний можно отделить от урана химическим путём, что значительно легче, чем разделять изотопы.

Выше указывалось на то, что цепная реакция при делении ядер урана и плутония происходит как взрыв огромной силы. Однако это может иметь место лишь в том случае, когда масса кусков $_{92}U^{235}$ или $_{94}Pu^{239}$ больше некоторой определённой величины, называемой критической. Дело в том, что в случае небольшой массы куска нейтроны, образовавшиеся при делении ядер, могут вылететь из куска и не вызвать дальнейшего деления ядер. Поэтому $_{92}U^{235}$ и $_{94}Pu^{239}$ можно безопасно хранить только в количествах, меньших критической массы.

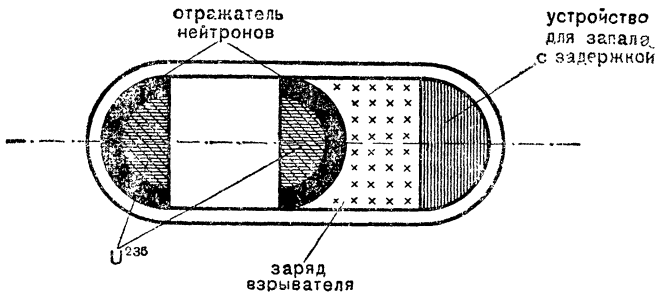


Рис. 354. Схематическое изображение атомной бомбы.

Для получения взрыва необходимо две части одного из двух указанных веществ (каждая из которых меньше критической массы, но в сумме ей равная) быстро привести в соприкосновение.

Решение этой задачи представлено схематически на рисунке 354. Два куска урана разъединены; если их сблизить, то вместе они будут иметь критическую массу; произойдёт цепная ядерная реакция, результатом которой будет взрыв. Куски урана сближаются в нужный момент с помощью запала и заряда взрывателя.

Взрыв атомной бомбы создаёт мощные воздушные волны, сопровождается резким повышением температуры, интенсивным излучением ослепляющего света и обильным радиоактивным излучением.

Основным поражающим фактором при взрыве атомной бомбы является ударная волна, которая представляет собой область сильно сжатого воздуха и распространяется со сверхзвуковой скоростью во все стороны от центра взрыва. При атомном взрыве образуются сильно ионизированные радиоактивные атомы более лёгких элементов, которые оседают, заражая местность и воздух, а также находящиеся на местности предметы, сооружения, технику и людей. Однако образовавшиеся при атомном взрыве радиоактивные вещества довольно быстро распадаются. Поэтому даже сильно заражённые участки местности или воды становятся безопасными через несколько дней.

202а. Термоядерная реакция. Мы рассмотрели получение внутриядерной энергии при делении ядер атомов тяжёлых элементов.

Но ядерную энергию можно получить и путём соединения ядер лёгких элементов. В качестве примера рассмотрим процесс образования ядра лёгкого элемента — гелия.

Ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, можно образовать, например, из ядер двух изотопов водорода — тяжёлого водорода (дейтерия) и сверхтяжёлого (трития).

Сближаясь, ядра дейтерия и трития попадают в сферу действия мощных сил ядерного притяжения. Эти силы связывают два нейтрона и два протона в устойчивую систему, представляющую собой ядро атома гелия. При этом лишний нейтрон выбрасывается с огромной скоростью.

В процессе образования ядра гелия ядерные силы совершают большую работу, результатом которой является увеличение кинетической энергии взаимодействующих частиц. Кинетическая энергия, возникающая за счёт работы ядерных сил, отдаётся в окружающую среду путём выбрасывания нейтрона, а также γ-излучением. При этих ядерных реакциях выделяется энергия, примерно в 10 раз большая, чем при реакциях деления ядер тяжёлых элементов (на единицу массы реагирующего вещества).

В отличие от деления ядер тяжёлых элементов реакция соединения ядер лёгких элементов может протекать только при очень высоких температурах, измеряемых миллионами и даже десятками миллионов градусов. Это обусловлено тем, что только при таких сверхвысоких температурах движение ядер становится настолько быстрым, что обеспечивает сильные взаимные удары ядер, при которых возможно непосредственное соединение их. *Ядерные реакции, происходящие при очень высоких температурах, называются термоядерными.*

Есть все основания полагать, что термоядерные реакции происходят в недрах Солнца и звёзд. За счёт этих реакций и пополняется энергия этих небесных светил.

На Земле единственным источником сверхвысоких температур в настоящее время является атомный взрыв.

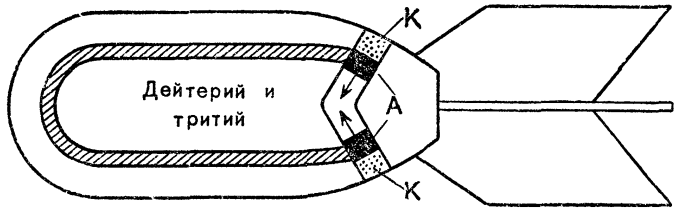


Рис. 354а.

Термоядерные реакции, которые удалось осуществить до настоящего времени, носят взрывной характер. Осуществить регулируемую термоядерную реакцию, протекающую медленно, подобно цепной реакции деления ядер тяжёлых элементов в урановых котлах, пока ещё не удаётся. В силу этого термоядерные реакции пока могут быть использованы только для создания бомб чрезвычайно больших мощностей. К числу бомб, в которых используется термоядерная реакция, относится так называемая водородная бомба.

Возможное устройство водородной бомбы схематически показано на рисунке 354а.

Водородная бомба должна иметь прочную металлическую оболочку, размеры которой больше размеров атомных бомб. В этой оболочке помещается запас водородного горючего, содержащего дейтерий и тритий. Вблизи него находятся два удалённых друг от друга куска A урана или плутония (заряд атомной бомбы).

Для сближения частей урана или плутония используются заряды обычного взрывчатого вещества *К* (тротила).

При взрыве тротила атомные заряды сближаются. В момент их соединения происходит атомный взрыв, развивается сверхвысокая температура, при которой происходит взрыв и водородного горючего.

Взрыв водородной бомбы сопровождается, так же как и атомный взрыв, высокой температурой, ударной волной и возникновением радиоактивных продуктов распада.

Так как для водородных бомб не существует критической массы, то мощность их принципиально не имеет ограничения.

203. Перспективы практического использования атомной энергии. Открытие атомной энергии принадлежит к числу самых значительных научных открытий XX века. В полной мере значение этого открытия для будущего человечества сейчас трудно предугадать.

К сожалению, это замечательное открытие было использовано в самом начале правящими кругами США для массового уничтожения людей при бомбардировке городов Хиросима и Нагасаки в войне против Японии (1945 г.).

Беспокоясь за судьбу своих сверхприбылей, реакционные капиталистические круги Америки всячески тормозят разработку проблемы применения атомной энергии для мирных промышленных целей. В то же время они расходуют огромные средства на создание большого количества атомных бомб.

Иначе к вопросу использования атомной энергии относится Советский Союз, который также обладает атомным и термоядерным оружием. Советский Союз энергично борется за запрещение оружия массового уничтожения, за ликвидацию имеющихся запасов атомных и водородных бомб и за широкое применение атомной энергии в мирной промышленности.

Так как атомная энергия может превращаться в другие виды энергии, то это даёт возможность строить теплоэлектроцентрали, в которых деление ядер ежедневно будет давать миллионы киловатт-часов энергии, которую можно передавать различным потребителям в виде энергии электрического тока. Реальными также являются перспективы создания двигателей, работающих на атомном «горючем».

Уже в настоящее время у нас действует первая в мире атомная электростанция на 5000 *квт*. В ближайшем будущем будут пущены атомные электростанции на значительно большие мощности. Широкое применение найдут медленно протекающие цепные реакции, которые сопровождаются равномерным превращением внутриядерной энергии в другие виды энергии.

Такие реакции осуществляются в урановых (атомных) котлах с помощью замедленных нейтронов.

На рисунке 355 изображена схема одной из возможных паросиловых установок с атомным котлом.

203а. Искусственная радиоактивность. В 1934 г. французские физики Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что при

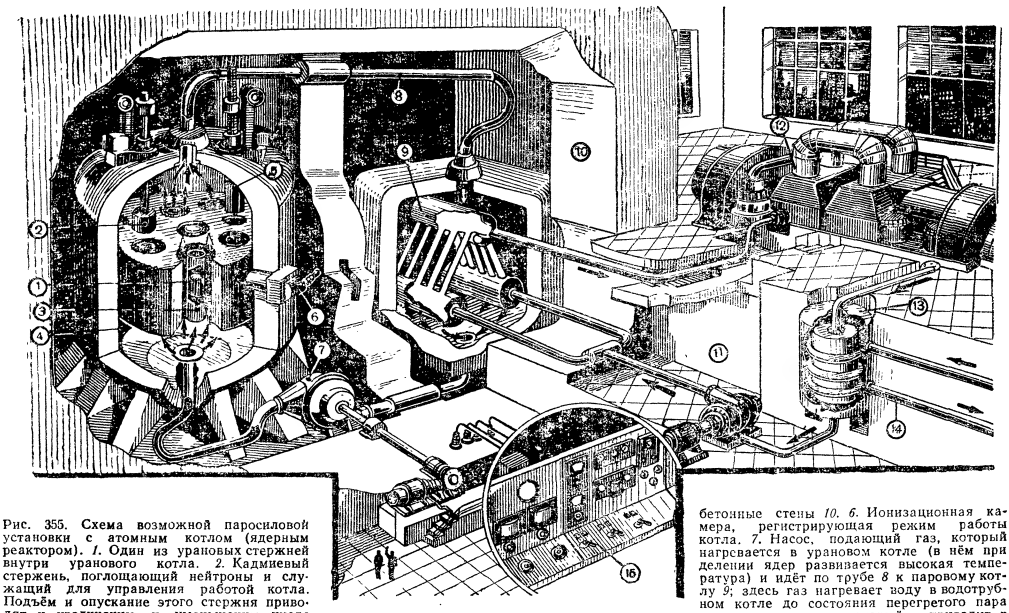


Рис. 355. Схема возможной паросиловой установки с атомным котлом (ядерным реактором). *1.* Один из урановых стержней внутри уранового котла. *2.* Кадмиевый стержень, поглощающий нейтроны и служащий для управления работой котла. Подъём и опускание этого стержня приводят к увеличению и уменьшению числа нейтронов, попадающих в реакционную камеру, а следовательно, к усилению или ослаблению процесса деления ядер. *3.* Алюминиевая оболочка, предохраняющая уран от коррозии. *4.* Графит, замедляющий нейтроны и этим способствующий усилению ядерных реакций. *5.* Бетонная стенка уранового котла, защищающая обслуживающий персонал от вредного действия радиоактивного излучения. Той же цели служат бетонные стены *10. 6.* Ионизационная камера, регистрирующая режим работы котла. *7.* Насос, подающий газ, который нагревается в урановом котле (в нём при делении ядер развивается высокая температура) и идёт по трубе *8* к паровому котлу *9*; здесь газ нагревает воду в водотрубном котле до состояния перегретого пара высокого давления, который и приводит в движение турбину электростанции *12. 13.* Котёл для охлаждения отработавшего пара. Последний нагревает воду, которая идёт по трубе *14* для отопления и других нужд.

бомбардировке алюминия α-частицами происходит ядерная реакция, которую можно записать следующим образом:

$$_{13}Al^{27} + _{2}\alpha^{4} \rightarrow _{15}P^{30} + _{0}n^{1}.$$

Замечательной особенностью этой ядерной реакции было то, что образовавшийся в результате её изотоп фосфора $_{15}P^{30}$ оказался радиоактивным: он самопроизвольно распадался, испуская позитроны, и превращался в устойчивый изотоп кремния:

$$_{15}P^{30} \rightarrow _{14}Si^{30} + \beta^{+}.$$

Вскоре были открыты и другие ядерные реакции, которые приводили к образованию радиоактивных элементов. Например, при бомбардировке магния α-частицами протекала следующая реакция:

$$_{12}Mg^{24} + _{2}\alpha^{4} \rightarrow _{14}Si^{27} + _{0}n^{1}.$$

Ядро магния, поглощая α-частицу, выбрасывало нейтрон и превращалось в ядро изотопа кремния $_{14}Si^{27}$. В отличие от устойчивого изотопа кремния $_{14}Si^{30}$, который появлялся в результате описанного выше превращения алюминия, изотоп кремния $_{14}Si^{27}$ оказался радиоактивным: он также самопроизвольно распадался, испуская позитроны, и превращался в алюминий по следующей схеме:

$$_{14}Si^{27} \rightarrow _{13}Al^{27} + \beta^{+}.$$

Таким образом, Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри открыли возможность создания искусственных радиоактивных элементов.

Они отличаются от естественных радиоактивных элементов (радий, уран, торий) только тем, что вместо электронов чаще всего испускают позитроны.

Это открытие имеет большое значение. Дело в том, что радиоактивные элементы получили широкое практическое применение. Естественные же радиоактивные элементы встречаются в малых количествах и их получение обходится очень дорого (см. § 192). Поэтому получение искусственных радиоактивных элементов из повсеместно распространённых дешёвых веществ открывает возможность их широкого производства.

203б. Применение радиоактивных элементов. Области практического применения радиоактивных элементов чрезвычайно разнообразны. Осветим только некоторые из них.

«Меченые» атомы. Так называются атомы радиоактивных элементов, введённые внутрь каких-либо тел. Наличие «меченых» атомов легко обнаружить: они испускают радиоактивные лучи, которые оставляют след на фотопластинке или производят ионизацию в камере счётчика (§ 194). С помощью счётчика можно обнаружить наличие в данном месте тела ничтожно

малого количества «меченых» атомов. Этим обстоятельством и пользуются при практическом применении «меченых» атомов. Приведём несколько примеров.

В жизни растений важную роль играет фосфор, извлекаемый ими из почвы в виде солей фосфорной кислоты — фосфатов. Поэтому при недостатке фосфора в почве её удобряют фосфатами, а для повышения урожайности сельскохозяйственных культур часто производят подкормку растений.

До последнего времени считалось, что минеральные соли поступают в растения в виде раствора через корни, а углекислый газ усваивается листьями. Однако агрономы обнаружили, что если при подкормке растений раствор с минеральными удобрениями вводить не в землю, а смачивать им листья, то растения развиваются быстрее. Возник вопрос, не попадают ли питательные вещества в растение и через листья. С помощью «меченых» атомов на этот вопрос удалось получить ответ.

Подкармливая растение удобрением, в которые были подмешаны радиоактивные атомы фосфора, учёные установили, что удобрение, нанесённое на лист растения, доходит до плода гораздо быстрее, чем удобрение, идущее из почвы через корень. Обнаружили это следующим образом.

Брали два одинаковых растения. Фосфатом, содержащим радиоактивный фосфор, поливали почву вокруг одного растения, а у другого наносили такой же раствор на листья. Спустя несколько дней оба растения срезали и клали на фотопластинку. После проявления на пластинках обнаруживались светлые места, которые указывали на расположение «меченых» атомов радиоактивного фосфора. Оказалось, что на фотографии растения, удобренного через листья, светлых мест больше. Следовательно, растение действительно быстрее усваивает удобрение тогда, когда оно вводится через листья.

Вводя в организм человека с пищей небольшие количества радиоактивного железа, натрия, йода и других элементов и регистрируя радиоактивное излучение, выходящее из разных частей тела, можно изучать распределение этих элементов в человеческом организме, скорость их распространения и другие процессы.

Медицина. Исключительно важное значение приобрели радиоактивные изотопы в медицинской диагностике. Например, в одном случае нужно было определить местоположение опухоли в мозгу.

Было известно, что ткани мозговой опухоли поглощают почти в сто раз больше фосфора, чем здоровые ткани. Больному сделали вливание раствора, содержащего радиоактивный фосфор. Опухоль, поглотившая в большом количестве «меченые» атомы фосфора, сразу же была обнаружена с помощью счётчика, перемещавшегося по черепной коробке.

Радиоактивное излучение радия давно применялось в меди-

цине для лечения раковых заболеваний. Но радий — редкий и дорогостоящий элемент, поэтому лечение проводилось лишь в немногих местах. Замена радия искусственными радиоактивными элементами резко изменила положение: указанный метод лечения стал общедоступным.

Применение в промышленности. Радиоактивное γ-излучение обладает способностью проникать через слои вещества более толстые, нежели в случае рентгеновского излучения. Для получения рентгеновского излучения нужна дорогостоящая, довольно громоздкая установка; в случае же использования γ-излучения нужен лишь кусочек искусственного радиоактивного вещества. Это обстоятельство позволяет проводить многие операции по просвечиванию всевозможных изделий из различных материалов с целью обнаружения в них изъянов (трещин, раковин) быстрее, проще и дешевле.

204. Взаимная превращаемость частиц. Мы говорили о так называемых элементарных частицах: электронах, протонах, нейтронах, позитронах, фотонах. Под элементарными частицами надо понимать такие частицы, которые на данном этапе развития физических знаний представляются простейшими, т. е. не состоят из других частиц.

Мы знаем теперь, что ядра атомов состоят из нейтронов и протонов; никакие другие элементарные частицы в состав атомного ядра не входят.

Между тем при радиоактивном распаде, кроме нейтронов и протонов, из ядер выбрасываются α-частицы, электроны и фотоны. Что касается α-частиц, то эти частицы сложные; они образуются в самом ядре из нейтронов и протонов.

Спрашивается: откуда берутся электроны и фотоны? В ядре их нет. Значит, они образуются в процессе распада ядра.

В настоящее время установлено, что испускание электрона происходит в результате превращения одного из ядерных нейтронов в протон. С другой стороны, протон, поглощая электрон, может превращаться в нейтрон.

Открыты процессы превращения фотонов в электроны и позитроны и, наоборот, электронов вместе с позитронами в фотоны, а также многие другие виды превращений.

Таким образом, *взаимная превращаемость является характернейшим признаком элементарных частиц.* Элементарные частицы не делятся, но они обладают свойством взаимного превращения.

Взаимная превращаемость частиц обусловливает необычайное богатство и многообразие явлений, разыгрывающихся в микромире, свидетельствуя о неисчерпаемости свойств материи.

Новые открытия в области атомной физики убедительнейшим образом подтверждают мысль В. И. Ленина, высказанную им в гениальном труде «Материализм и эмпириокритицизм»:

«Признание каких-либо неизменных элементов, «неизменной сущности вещей» и т. п. не есть материализм, а есть *метафизический,* т. е. антидиалектический материализм.

«Сущность» вещей или «субстанция» *тоже* относительны; они выражают только углубление человеческого познания объектов, и если вчера это углубление не шло дальше атома, сегодня — дальше электрона и эфира, то диалектический материализм настаивает на временном, относительном, приблизительном характере всех этих *вех* познания природы прогрессирующей наукой человека. Электрон так же *неисчерпаем*, как и атом, природа бесконечна...»

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ I «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ»

1. Закон Кулона в системе единиц СИ. В Международной системе единиц (СИ) единица количества электричества — кулон не основная, а производная единица, поэтому формула закона Кулона $F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$ в этой системе не является определяющей и коэффициент пропорциональности k не равен единице.

В системе СИ формула закона Кулона для вакуума записывается в следующем виде:

$$F=k\frac{q_1q_2}{r^2},\ \text{где}\ k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0},\ \text{следовательно,}$$

$$F=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Величина ε_0, входящая в формулу закона Кулона, называется электрической постоянной вакуума.

Число 4π, стоящее в знаменателе формулы закона Кулона, характеризует тот факт, что влияние заряда распределяется равномерно во все стороны и изменяется обратно пропорционально поверхности сферы (описанной вокруг заряда, как из центра, радиусом r), которой достигает действие заряда.

Значение коэффициента пропорциональности k можно получить из формулы закона Кулона:

при $q_1=q_2=1$ *к* и $r=1$ *м*

$$k=F\ \frac{н\cdot м^2}{к^2}.$$

Следовательно, *коэффициент пропорциональности k численно равен силе, выраженной в ньютонах, с которой взаимодействуют два заряда по 1 кулону каждый на расстоянии 1 метр друг от друга*:

$$k=9\cdot10^9\ \frac{н\cdot м^2}{к^2}.$$

Значение электрической постоянной вакуума определится из формулы:

$$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0};$$

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi k};$$

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\cdot 3{,}14\cdot 9\cdot 10^9\ \frac{н\cdot м^2}{к^2}}\approx 8{,}8\cdot 10^{-12}\ \frac{к^2}{н\cdot м^2}.$$

Влияние среды на силу взаимодействия электрических зарядов характеризуется диэлектрической проницаемостью среды (см. § 13).

Закон Кулона для двух зарядов, находящихся в среде с диэлектрической проницаемостью ε, выразится формулой:

$$F=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon r^2}.$$

Отношение диэлектрической проницаемости среды к электрической постоянной вакуума называется относительной диэлектрической проницаемостью среды (ε_r):

$$\varepsilon_r=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0},$$

откуда $\varepsilon=\varepsilon_r\cdot\varepsilon_0$. Подставим значение ε в формулу закона Кулона, получим:

$$F=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 r^2}.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость — величина отвлечённая. Диэлектрическая проницаемость среды имеет такое же наименование, как и электрическая постоянная вакуума.

На странице 23 приведены относительные диэлектрические проницаемости некоторых веществ.

2. Формула для расчёта ёмкости плоского конденсатора в системе единиц СИ. Расчёты, которые выходят за пределы нашего курса, показывают, что ёмкость плоского конденсатора в системе единиц СИ рассчитывается по формуле:

$$C=\frac{\varepsilon S}{d}.$$

В этой формуле ёмкость конденсатора выражается в фарадах:
S — площадь одной из пластин конденсатора в $м^2$;
d — расстояние между пластинами (толщина диэлектрика) в $м$;
ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами.

Из формулы ёмкости плоского конденсатора следует, что диэлектрическая проницаемость диэлектрика измеряется в системе СИ в $\frac{ф}{м}$:

$$\varepsilon=\frac{Cd}{S},$$

$$\text{ед. } \varepsilon=1\ \frac{ф\cdot м}{м^2}=1\ \frac{ф}{м}.$$

Но ранее для диэлектрической проницаемости среды мы получили наименование $\frac{к^2}{н\cdot м^2}$.

Покажем, что $1\ \frac{к^2}{н\cdot м^2}=1\ \frac{ф}{м}$.

$$1\ \frac{к^2}{н\cdot м^2}=1\ \frac{к\cdot к}{н\cdot м\cdot м}=1\ \frac{к\cdot к}{дж\cdot м}=1\ \frac{к}{в\cdot м}=1\ \frac{ф}{м}.$$

3. Энергия заряженного конденсатора. Если заряженный конденсатор соединить с маловольтной лампочкой, то лампочка ярко вспыхнет. Этот опыт показывает, что заряженный конденсатор обладает энергией. Энергия у конденсатора появляется за счёт работы, которая совершается при его зарядке. Эта работа и будет мерой энергии заряженного конденсатора. Как подсчитать эту работу?

При зарядке конденсатора заряд на его пластинах появляется не мгновенно, а накапливается постепенно, небольшими порциями. После появления на пластине конденсатора первой порции заряда следующие новые порции заряда будут уже отталкиваться имеющимися на конденсаторе зарядами, и поэтому, чтобы сообщить конденсатору новую порцию заряда, нужно совершить работу по преодолению электрических сил отталкивания.

По мере увеличения заряда на пластинах конденсатора растёт и напряжение на них. Среднее значение напряжения на пластинах конденсатора в течение всего процесса зарядки можно считать равным половине его окончательной величины:

$$U_{ср}=\frac{U}{2},\ \text{где}\ U=\varphi_1-\varphi_2.$$

Работа, совершаемая при движении заряда в электрическом поле при среднем значении напряжения, равном $U_{ср}$, найдётся по формуле:

$$A=U_{ср}q,\ \text{или}\ A=\frac{Uq}{2}.$$

Величина этой работы равна энергии, накопленной в конденсаторе при зарядке:

$$A=W=\frac{Uq}{2}.$$

Так как $q=CU$, то энергию конденсатора можно выразить через его электроёмкость и напряжение:

$$W=\frac{CU^2}{2}.$$

Накопленная при зарядке конденсатора энергия представляет

собой энергию электрического поля, образующегося между пластинами конденсатора. Эта энергия при разрядке конденсатора превращается в другие виды, например во внутреннюю энергию тел, световую, химическую и др.

II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Проводимость полупроводников. Для металлического проводника, как известно, характерно наличие большого числа свободных электронов — электронов проводимости, которые имеются в металле при любой температуре, даже при абсолютном нуле.

Существует обширный класс веществ, так называемых полупроводников, отличающихся от металлов прежде всего тем, что в них при обычных температурах содержится значительно меньшее количество свободных электронов. Так, если в 1 $см^3$ металла при комнатной температуре имеется 10^{22}—10^{23} свободных электронов, то в таком полупроводнике, например, как германий, при той же температуре содержится только 10^{12}—10^{13} свободных электронов в каждом кубическом сантиметре его объёма, т. е. во много миллионов раз меньше, чем в металле. Малая концентрация свободных электронов в полупроводниках обусловливает их очень большое удельное сопротивление.

К полупроводникам, кроме выше названного германия, относятся кремний, селен, закись меди, сернистый свинец и многие другие вещества.

Подключая полупроводник к источнику тока и нагревая этот полупроводник, мы заметим резкое возрастание тока в нём. Нагревание же проводника, по которому идёт ток, приводит к уменьшению тока. Следовательно, полупроводники, в отличие от металлов, имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Как же можно объяснить это явление?

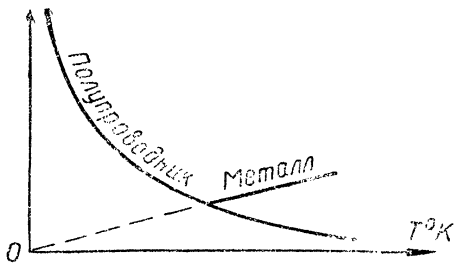


Рис. 1. Графики зависимости сопротивлений проводника (металла) и полупроводника от температуры.

При нагревании полупроводника происходит резкое увеличение числа свободных электронов.

Если полупроводник нагреть до достаточно высокой температуры, то его удельное сопротивление может стать близким к удельному сопротивлению металлов.

На рисунке 1 изображены графики зависимости сопротивления проводника и полупроводника от температуры.

Полупроводники используют в термосопротивлениях — приборах, которые сильно изменяют величину сопротивления при

нагревании. Например, термосопротивление ММТ-4 имеет температурный коэффициент сопротивления — 0,024 *град*$^{-1}$, а полное его сопротивление при 20° С порядка 10 *ком*. Даже при слабом нагревании этого сопротивления над пламенем спиртовки можно наблюдать значительное увеличение тока (рис. 2). Это свойство

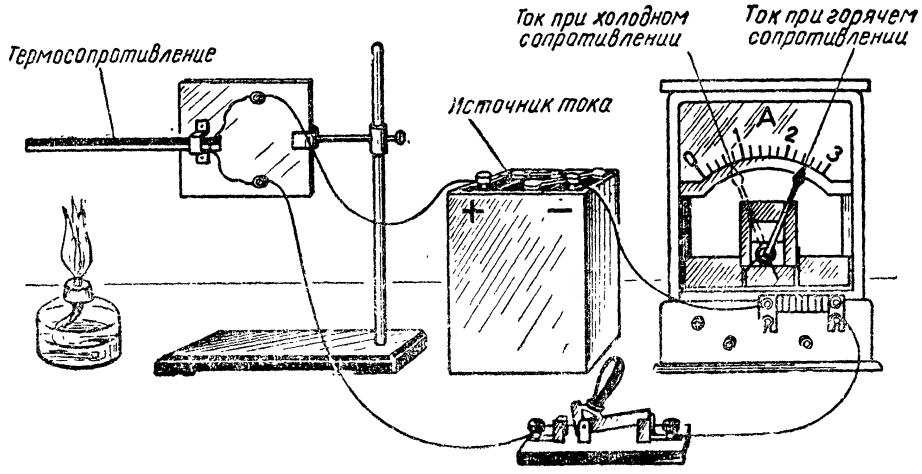


Рис. 2. Опыт, показывающий уменьшение сопротивления полупроводника при нагревании.

термосопротивлений даёт возможность широко использовать их в специальных устройствах для измерения температуры электрическими методами (в термометрах сопротивления).

2. Фотосопротивления. Полупроводники, сопротивление которых изменяется под действием света, получили название фотосопротивлений. В фотосопротивлении электроны под действием света, переходя из связанного состояния в свободное, увеличивают проводимость полупроводника. Чем больше освещённость, тем больше проводимость фотосопротивления.

Фотосопротивление может быть изготовлено путём нанесения тонкого слоя селена, сернистого таллия или другого светочувствительного полупроводника на решётку, образованную параллельными тонкими проводниками (рис. 3).

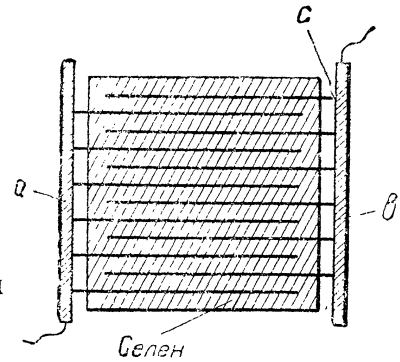


Рис. 3. Устройство селенового сопротивления: *a* и *b* — электроды; *c* — штрихи на подкладке.

Фотосопротивления обладают высокой чувствительностью к изменению света. Поэтому они широко применяются в автоматике, телемеханике и т. д. Очень высокая чувствительность фотосопротивлений, изготовленных из серни-

стого свинца и селенистого свинца, позволяет использовать их при астрономических наблюдениях для фиксации излучений, не воспринимаемых глазом человека даже через самые сильные телескопы.

3. Собственная проводимость полупроводников. Проводимость полупроводников, не содержащих примесей, получила название собственной проводимости.

При абсолютном нуле температуры собственная проводимость у полупроводников отсутствует и они не проводят электричества. Это означает, что при абсолютном нуле в полупроводниках нет свободных электронов — электронов проводимости.

При повышении температуры полупроводника валентные электроны получают дополнительную энергию и некоторые из них оказываются способными разорвать свои связи с атомом, становясь при этом свободными электронами — электронами проводимости. Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, называется энергией ионизации. Величина её для разных полупроводников различна.

Электроны проводимости в полупроводниках ведут себя подобно электронам проводимости в металлах, т. е. они свободно перемещаются между атомами и ионами пространственной решётки. Ионизированные же атомы не могут свободно перемещаться, так как они прочно связаны в узлах кристаллической решётки.

В ионизированном атоме полупроводника на месте ушедшего электрона возникает вакантное (свободное) место, которое может быть занято другим электроном. Это свободное место получило название дырки.

Если на свободное место перейдёт один из связанных электронов соседнего атома, то это место окажется занятым, но зато появится свободное место у соседнего атома и т. д. Последовательное заполнение свободных мест электронами, которые не потеряли своих связей с атомами (связанными электронами), создаёт впечатление о непрерывном перемещении дырки.

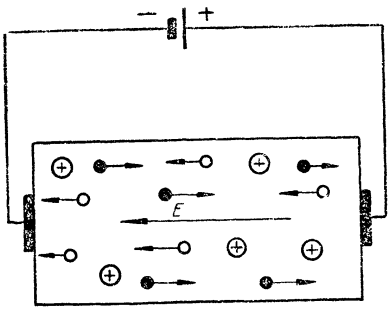


Рис. 4. Движение электронов и дырок в полупроводнике под действием внешнего поля E.

В идеально чистом полупроводнике число дырок всегда равно числу электронов проводимости и они также хаотически движутся, как и электроны.

Под действием электрического поля E, созданного в полупроводнике внешним источником напряжения (рис. 4), электроны проводимости будут двигаться навстречу силовым линиям поля, а дырки станут перемещаться в противоположную сторону, подобно положитель-

ным зарядам. Объясняется это тем, что связанные электроны, как и электроны проводимости, перемещаются от одного атома к другому (соседнему), навстречу силовым линиям электрического поля, а дырки — в противоположную сторону.

Если дырки перемещаются в ту же сторону, что и положительные заряды, то дырке можно приписать знак положительного заряда, величина которого равна заряду электрона.

Следовательно, ток в полупроводнике создаётся движением не только электронов проводимости, но и дырок. Поэтому и говорят, что полупроводник обладает как электронной, так и дырочной проводимостью. Полный ток $i_п$ в полупроводнике будет равен сумме токов, вызванных электронной проводимостью ($i_э$) и дырочной проводимостью ($i_д$):

$$i_п = i_э + i_д.$$

В процессе движения электронов проводимости и дырок свободные электроны могут занимать вакантные места в системе атома, возвращая ему нейтральное состояние. Такой процесс на-

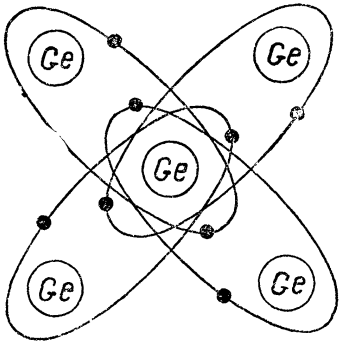


Рис. 5. Упрощённое изображение электронных связей в кристалле германия. Чёрные кружки — валентные электроны.

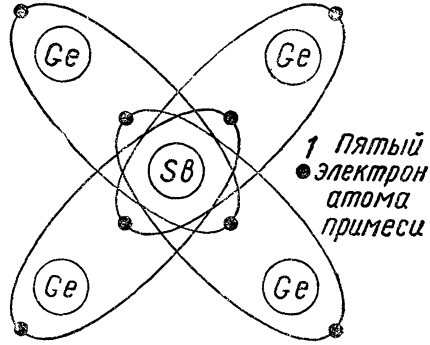


Рис. 6. Замещение атома германия атомом сурьмы. Чёрный кружок с цифрой «1» — избыточный электрон.

зывается рекомбинацией электронов и дырок. Этот процесс противоположен ионизации, так как он ведёт к уничтожению электронов проводимости и дырок. В полупроводнике оба указанных процесса происходят одновременно таким образом, что при неизменной температуре плотность электронов проводимости и дырок сохраняется.

Ионизация атомов полупроводника может происходить не только в процессе нагревания полупроводника, но и при его облучении светом, подобно тому как это имеет место при газовом разряде.

4. Примесная проводимость. На свойства полупроводника и характер его проводимости большое влияние оказывают примеси. Обычно в проводнике содержится много различных приме-

сей, но среди них есть какая-то основная, которая главным образом и определяет свойства полупроводника.

Напомним природу связей, существующих между атомами чистого полупроводника, например германия (Ge). Атом германия имеет четыре валентных электрона. Каждый из этих электронов одновременно вращается вокруг двух атомов (рис. 5). Поэтому в образовании каждой связи между атомами участвуют два электрона одновременно, только эти электроны принадлежат к разным атомам. Такие связи между атомами получили название ковалентных связей.

Если в кристаллическую решётку германия включить атом пятивалентного элемента, например сурьмы (Sb), то четыре его электрона будут участвовать в образовании ковалентных связей, а пятый электрон в образовании ковалентных связей не участвует. Он оказывается связанным со своим атомом только сравнительно слабым притяжением ядра (рис. 6). Поэтому этот электрон в результате теплового движения легко может быть отщеплён даже при температуре ниже комнатной и стать свободным электроном, т. е. электроном проводимости. В этом случае дырки не образуется, так как ковалентная связь в полученной структуре кристалла, характерной для германия, полностью осуществляется четырьмя электронами примеси, но только в узле решётки вместо атома германия находится положительный ион примеси. Этот ион не может принять участия в движении, так как прочно связан с решёткой. Следовательно, единственным образовавшимся свободным зарядом является электрон. Такой тип полупроводника, получивший электронную проводимость за счёт электронов примеси, получил название полупроводника *n*-типа (от слова *negativus* — отрицательный).

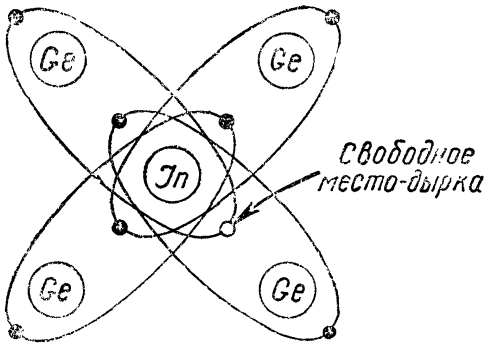


Рис. 7 Схема образования дырки при замещении атома германия атомом индия.

Возможно включение в кристаллическую решётку и трёхвалентного атома примеси, например индия (In). В этом случае для образования полной ковалентной связи не хватит одного электрона (рис. 7). Появляется свободное место, но оно не может быть заполнено при низких температурах, так как нет электронов, способных его заполнить. С повышением температуры создаются благоприятные условия для разрушения валентных связей, а при достаточно высокой температуре наблюдается переход электронов, участвовавших в ковалентных связях сосед-

них атомов германия на свободное место. В структуре валентных связей атомов германия образуется дырка, которая является свободным носителем положительного заряда. Эта дырка теперь может перемещаться. Отрицательные ионы (ионы индия) остаются неподвижными в узлах кристаллической решётки, так как они прочно связаны с соседними атомами германия. В таком полупроводнике электрический ток создаётся движением дырок, а потому он обладает дырочной проводимостью и называется полупроводником p-типа (от слова *positivus* — положительный).

Практически все полупроводники содержат примеси того и другого типа. Однако один из видов примесей обычно преобладает, в зависимости от этого полупроводники разделяются на два типа. Если преобладает электронная проводимость, то электроны считаются основными носителями зарядов, а если преобладает дырочная проводимость, то основными носителями зарядов являются дырки. Однако и заряды, противоположные по знаку основным,— неосновные носители зарядов — играют весьма существенную роль при устройстве различных полупроводниковых приборов.

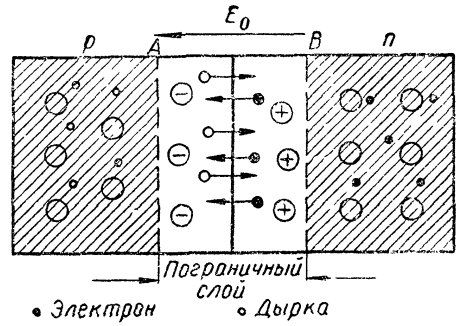


Рис. 8. Схема процессов, происходящих при контакте двух полупроводников n-типа и p-типа.

5. Контакт двух полупроводников. Контакт между двумя полупроводниками с разным типом проводимости обладает очень интересным и важным свойством: сопротивление контакта зависит от направления тока, т. е. контакт обладает практически односторонней проводимостью. Это позволяет использовать его для выпрямления переменного тока, подобно вакуумному диоду.

Рассмотрим процессы, протекающие при контакте полупроводников. Соединим плотно два полупроводника n-типа и p-типа вместе (рис. 8). Электроны и дырки сразу же начнут взаимно диффундировать из одного полупроводника в другой, и между полупроводниками возникнет контактная разность потенциалов. Действительно, электроны из полупроводника n-типа, диффундируя в пограничный слой полупроводника p-типа и рекомбинируясь с дырками, «обнажат» отрицательные ионы примеси. В пограничном слое полупроводника p-типа возникнет отрицательный заряд, созданный отрицательными ионами. Аналогичный процесс в пограничном слое полупроводника n-типа создаёт положительный заряд, образованный положительными ионами примеси. Возникает двойной электрический «слой» (подобно заряженным пластинам конденсатора). Электрическое поле E_0 двойного электрического слоя при достижении определённой величи-

ны воспрепятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок. Но пограничные области полупроводников в результате обедняются основными носителями зарядов, поэтому эти области будут обладать большим сопротивлением. Совокупность этих областей получила название запирающего слоя (слой AB на рис. 8).

Электрическое поле E_0 запирающего слоя часто называют контактным полем. Контактное поле, препятствуя движению основных носителей заряда, способствует движению неосновных носителей зарядов, которые содержатся в малых количествах в каждом полупроводнике.

Если полупроводник p (рис. 9) соединить с положительным полюсом батареи, а полупроводник n с отрицательным, то в по-

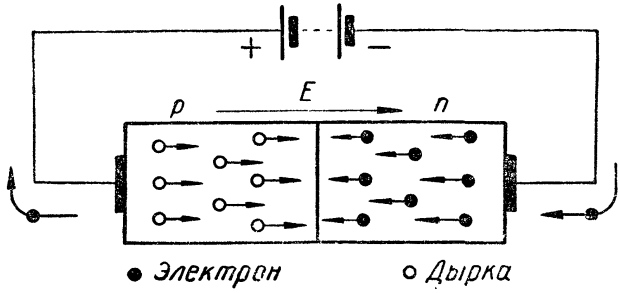


Рис. 9. Движение свободных электронов и дырок в полупроводнике при включении источника тока в пропускном направлении (прямой ток).

лупроводниках возникнет электрическое поле E, силовые линии которого будут направлены от полупроводника p к полупроводнику n. Это поле ослабит контактное поле E_0. Электроны и дырки начнут двигаться к границе соприкосновения полупроводников навстречу друг другу, обогащая запирающий слой основными носителями заряда и уменьшая его сопротивление. В пограничном слое происходит рекомбинация электронов и дырок. Убыль электронов в полупроводнике n компенсируется их поступлением из проводника, соединённого с отрицательным полюсом источника, а убыль дырок компенсируется уходом электронов из полупроводника p к положительному полюсу источника.

Описанный процесс в случае замкнутой цепи происходит непрерывно и, следовательно, в цепи непрерывно существует ток. Этот ток называется прямым током, а напряжение, при котором он возникает,— прямым напряжением.

Значительная величина прямого тока может быть получена при сравнительно небольшом прямом напряжении, так как сопротивление пограничного слоя относительно мало.

При изменении полярности напряжения, т. е. при обратном напряжении, приложенном к полупроводникам, происходит

резкое изменение величины тока, проходящего через пограничный слой полупроводников.

В этом случае направление силовых линий внешнего поля E в полупроводниках изменяется на противоположное. Поэтому электроны в полупроводнике n начнут двигаться от пограничного слоя к положительному полюсу источника, а дырки в полупроводнике p — к отрицательному полюсу источника (рис. 10). Такое движение основных носителей заряда вызовет расширение пограничного слоя и увеличение его сопротивления. Но движение электронов и дырок продолжается короткое время, так как по обе стороны от границы полупроводников происходит мгновенное увеличение объёмных электрических зарядов. Эти заряды воспрепятствуют дальнейшему движению основных носителей заряда, и тока в цепи не будет.

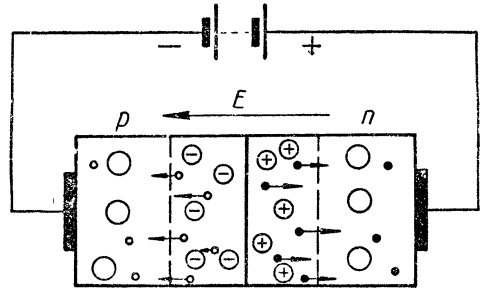


Рис. 10. Движение свободных электронов и дырок в полупроводнике при включении источника тока в «запорном» направлении (обратный ток).

Практически же при обратном напряжении всё-таки существует некоторый ток — *обратный ток*. Объясняется это тем, что в полупроводниках под влиянием тепловых процессов происходит незначительное образование свободных электронов и дырок, которые не являются основными носителями зарядов в них. Эти электроны и дырки создают слабый обратный ток. С повышением температуры полупроводников обратный ток возрастает.

Односторонней проводимостью обладает не только пограничный слой между полупроводниками, но и пограничный слой между полупроводником и металлом. Однако механизм проводимости в этом случае значительно сложнее.

6. Полупроводниковый диод. Односторонняя проводимость пограничного слоя (запирающего слоя, или $p-n$-перехода) между двумя полупроводниками широко используется в устройствах, которые получили название полупроводниковых диодов.

Существует много различных типов полупроводниковых диодов. Рассмотрим устройство германиевого диода.

Германиевый диод изготовляют из монокристалла германия, к которому добавляют примеси (мышьяк, сурьма и др.), улучшающие его n-проводимость. С одной стороны германиевой пластинки вплавляют небольшой кусочек индия, создающий проводимость p-типа. Причём атомы индия не должны проникать во всю толщу германия, ибо тогда весь германий будет обладать p-проводимостью. Таким образом, две области германиевой пластинки с разными видами проводимости, непосредственно примыкающие друг к другу, создают $p-n$-переход (рис. 11).

На рисунке 12 показано устройство германиевого диода. Он состоит из сплавленных кристаллов германия *1* и индия *2*, которые соединены с токоснимателями *3* и *4*. Токосниматель *4* через металлический корпус *5* соединяется с контактным выводом *7*. Токосниматель *3* с помощью стеклянного изолятора *6* изолирован от корпуса и соединяется с контактным выводом *8*. Герметический корпус служит для защиты полупроводников от влаги, которая способна резко ухудшать работу полупроводников.

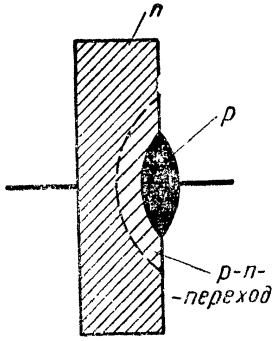


Рис. 11. Две области германиевой пластинки с разными видами проводимости создают $p-n$ переход.

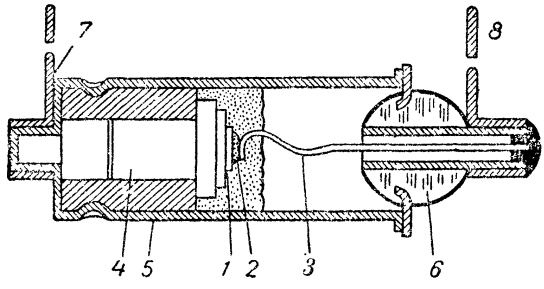


Рис. 12. Устройство германиевого диода.

Электрод, соединённый с кристаллом индия, является анодом, а катодом является электрод, соединённый с германием. Изображение полупроводникового диода на схемах показано на рисунке 13.

Рис. 13. Изображение полупроводникового диода на схемах.

Полупроводниковые диоды широко применяются для выпрямления переменного тока. Схемы выпрямителей с полупроводниковыми диодами аналогичны схемам с вакуумными диодами и отличаются от них только отсутствием цепей накала (глава IV, рис. 198). Это упрощает схемы выпрямителей и повышает их экономичность.

7. Вентильные фотоэлементы. Явление перехода электронов в веществе из связанного состояния в свободное под действием света называется фотоэффектом.

Если электроны, ставшие свободными, остаются в веществе, повышая его электропроводность, то фотоэффект называется внутренним. Если же они покидают освещённое вещество, то фотоэффект называется внешним. Но возможно и промежуточное явление, когда электроны, ставшие свободными, из слоя освещённого вещества переходят в слой неосвещённого вещества, отделённого тонким запирающим слоем. Такое явление называется вентильным фотоэффектом.

Явление вентильного фотоэффекта было открыто на опытах с селеном в 1888 г. профессором Казанского университета В. Я. Ульяниным. Техническое применение это явление получило лишь в 30-х годах нашего столетия в устройстве фотоэлементов.

На рисунке 14 показано устройство медно-закисного фотоэлемента. Он состоит из медного подстила, на который наносится столь тонкий слой закиси меди, что он прозрачен. Освещаемый слой лежит между медным подстилом и прозрачной плёнкой закиси меди. Освобождающиеся под действием света

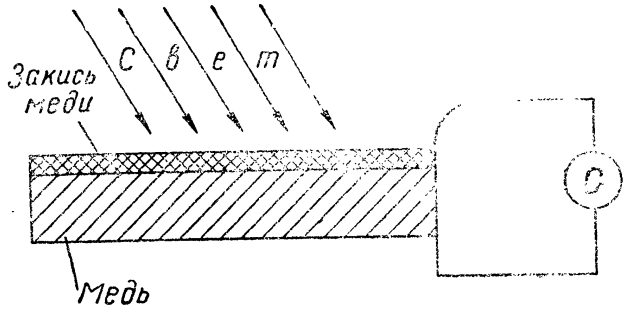


Рис. 14. Схема устройства медно-закисного фотоэлемента.

электроны, диффундируя в металл, заряжают его отрицательно. Таким образом, между металлом и плёнкой закиси меди создаётся разность потенциалов, которая пропорциональна освещённости фотоэлемента.

Широкое распространение в практике получили селеновые фотоэлементы. В частности, они применяются при устройстве фотоэкспонометров, позволяющих простейшим способом измерять освещённость. В этом случае селеновый фотоэлемент непосредственно соединяют с гальванометром и по величине тока судят об освещённости поверхности фотоэлемента.

Устройство селенового фотоэлемента сходно с медно-закисным.

В селеновом фотоэлементе на железную пластинку наносится слой термически обработанного селена. Последний покрывается тончайшим прозрачным слоем золота. Запирающий слой образуется между селеном и плёнкой золота.

Вентильный фотоэлемент представляет собой фотоэлектрогенератор, в котором энергия света преобразуется в электрическую энергию.

Электродвижущая сила одного фотоэлемента не превышает 1 *в*. Для получения больших напряжений фотоэлементы соединяют в батареи.

В современных батареях из кремниевых фотоэлементов в электрическую энергию превращается 10—15% энергии падающего на них света. Они представляют собой генераторы электрической энергии с довольно высоким к. п. д. Такие батареи при-

меняют для питания телефонных сетей небольших населённых пунктов. Исключительно большое значение подобные батареи имеют при питании бортовой радиоаппаратуры искусственных спутников Земли. Для бесперебойного питания потребителей электрической энергии в ночное время фотобатареи сочетают с аккумуляторами.

Большая заслуга в развитии техники полупроводников принадлежит крупному советскому учёному А. Ф. Иоффе.

8. Термоэлементы на полупроводниках. Термоэлектрогенератор. В § 58 главы II были рассмотрены термоэлементы (термопары), изготовленные из металлических проволок или лент (висмут — сурьма, константан — железо, медь — железо и др.).

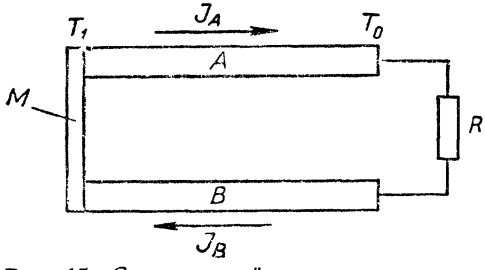


Рис. 15. Схема устройства полупроводникового термоэлемента.

Термоэлемент можно рассматривать как термоэлектрическую машину, которая без всяких движущихся механизмов превращает часть энергии топлива, израсходованного на нагрев спая, в электрическую энергию.

Коэффициент полезного действия металлических термоэлементов, вследствие больших непроизводительных потерь энергии, очень мал: он не превышает 0,5%. Поэтому металлические термоэлементы как источники электрической энергии (термоэлектрогенераторы) не применяются. Они используются в науке и технике для измерения температур.

Значительно перспективнее как источники электроэнергии оказались полупроводниковые термоэлементы.

Полупроводниковый термоэлемент, схема устройства которого показана на рисунке 15, состоит из двух, соединённых металлическим проводом M полупроводниковых ветвей. Одна из ветвей (A) изготовлена из полупроводника с электронной проводимостью, другая же ветвь (B) — из полупроводника с дырочной проводимостью. Соединяющий их металлический провод подогревают, а два других конца полупроводников охлаждают воздухом или проточной водой. Эти концы присоединяют к потребителю электроэнергии R. (Потребителем может быть радиоприёмник, электрическая лампа, электродвигатель и др.)

На рисунке 15 стрелки указывают направление тока в ветвях термоэлемента.

В полупроводнике A с электронной проводимостью электрическое поле, а следовательно, и ток (I_A) направлены от горячего его конца к холодному, в полупроводнике же с дырочной проводимостью — от холодного к горячему (I_B).

При одинаковой разности температур горячих и холодных

спаев э. д. с. у полупроводниковых термоэлементов в десятки раз больше, чем э. д. с. металлических термоэлементов (см. таблицу э. д. с., § 58).

Коэффициент полезного действия полупроводниковых термоэлементов доходит до 7%, но может быть и больше.

Для получения значительных э. д. с. термоэлементы соединяют в термобатареи.

На рисунке 16 изображён термоэлектрогенератор, созданный в лаборатории полупроводников Академии наук СССР. В этом генераторе термоэлементы расположены радиально. Внутренние спаи термобатареи нагреваются горячими газами керосиновой лампы, а наружные спаи охлаждаются комнатным воздухом. Радиаторные пластины улучшают процесс охлаждения спаев. Такая конструкция термоэлектрогенератора позволяет поддерживать разность температур горячих и холодных спаев около 300 *град.*

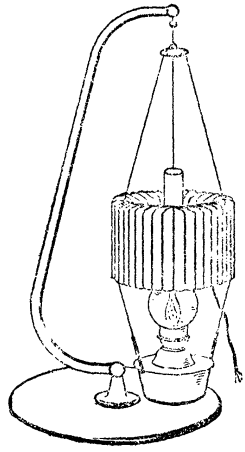


Рис. 16. Термоэлектрогенератор.

Термоэлектрические генераторы могут работать на любом топливе: угле, дровах, торфе и т. д.

Изображённый на рисунке 16 термоэлектрогенератор широко используют для питания радиоприёмников в сельских местностях.

Дальнейшее развитие и усовершенствование полупроводниковых термоэлементов позволит широко применять их для получения электроэнергии. Весьма вероятно, что с помощью термоэлектрических батарей в скором времени можно будет превращать энергию солнечных лучей в электроэнергию.

III. ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ III «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ»

1. Индукция магнитного поля тока. Магнитная проницаемость. Всякое вещество под действием магнитных сил способно в той или иной степени намагничиваться. Но одни вещества (воздух, вода, дерево, уголь, алюминий, медь и т. д.) намагничиваются очень слабо, другие (железо, сталь и ряд специальных сплавов), наоборот, намагничиваются очень сильно.

Способность вещества намагничиваться характеризуют величиной, называемой магнитной проницаемостью. Обозначают эту величину греческой буквой μ («мю»).

Допустим, что в среде с некоторой магнитной проницаемостью существует магнитное поле, создаваемое током, протекающим по прямолинейному проводнику.

Очевидно, что, чем сильнее ток в проводнике, тем больше будет и индукция магнитного поля его в какой-нибудь точке пространства, окружающего ток. Кроме этого, индукция поля убывает с удалением от проводника, так как магнитное поле тока с расстоянием ослабевает. Вместе с этим индукция поля зависит от способности среды намагничиваться, т. е. от магнитной проницаемости среды.

Как показывают расчёты и опыт, индукция магнитного поля в какой-нибудь точке D (рис. 17), отстоящей от прямолинейного

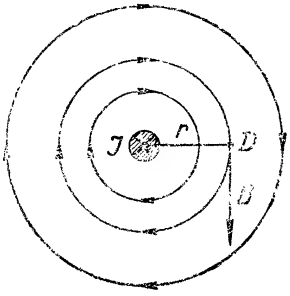


Рис. 17. Вектор индукции поля B прямого тока I в точке D, отстоящей от проводника с током на расстоянии r.

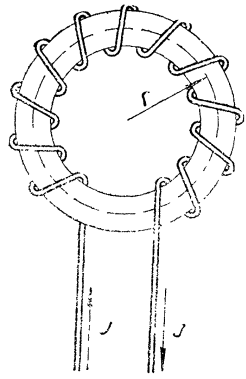


Рис. 18. Катушка в форме замкнутого кольца (тора).

проводника с током на некотором расстоянии r, может быть определена по формуле:

$$B=\mu\frac{J}{2\pi r}, \qquad (1)$$

где B — индукция магнитного поля;

I — ток;

r — расстояние от оси проводника до исследуемой точки поля;

μ — магнитная проницаемость среды.

Для практической электротехники важно уметь рассчитывать индукцию магнитного поля внутри катушки с током. Если катушка имеет форму замкнутого кольца (тора) (рис. 18), диаметр которого значительно меньше его длины, то индукцию поля внутри катушки можно вычислять по формуле:

$$B=\mu nI,$$

где n — число витков, приходящихся на единицу длины катушки (густота намотки витков).

Исходя из формулы (1), магнитную проницаемость среды определяют по формуле:

$$\mu=\frac{2\pi rB}{J}.$$

Получим наименование единицы магнитной проницаемости в системе СИ. Для этого выразим индукцию поля B в $\frac{вб}{м^2}$, или $\frac{в \cdot сек.}{м^2}$, силу тока I в амперах и расстояние r в метрах, тогда

$$\text{ед. } \mu = 1 \frac{вб \cdot м}{м^2 \cdot а} = 1 \frac{в \cdot сек \cdot м}{м^2 \cdot а} = 1 \frac{в \cdot сек}{а \cdot м} = 1 \frac{ом \cdot сек}{м}.$$

Единица *ом·сек* называется генри (сокращённо *гн*). Таким образом, за единицу измерения магнитной проницаемости в системе СИ принята $1 \frac{гн}{м}$.

Величину магнитной проницаемости среды μ выражают в виде произведения двух сомножителей:

$$\mu = \mu_r \mu_0,$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, она называется магнитной постоянной;

μ_r — относительная магнитная проницаемость—число отвлечённое, показывающее отношение величины магнитной проницаемости данного вещества к величине магнитной постоянной:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

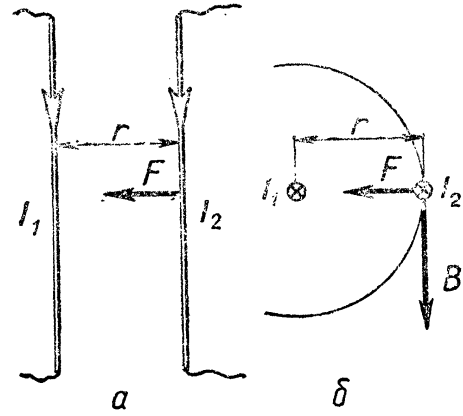


Рис. 19. Взаимодействие между двумя параллельными проводниками при протекании по ним токов.

Величина магнитной постоянной может быть рассчитана по силе взаимодействия между двумя параллельными бесконечно длинными проводниками. Об этом будет рассказано ниже.

2. Взаимодействие параллельных токов. Единица силы тока—ампер. Магнитная постоянная. Рассмотрим, как можно рассчитать силу взаимодействия между двумя параллельными проводниками при протекании по ним токов (рис. 19, *а*). Пусть I_1 и I_2 — токи в проводниках, l — длины проводников, r — расстояние между ними, μ — магнитная проницаемость среды, окружающей проводники.

Индукция магнитного поля тока I_1 в точке (рис. 19, *б*), отстоящей от первого проводника на расстоянии r, выразится формулой:

$$B = \mu \frac{I_1}{2\pi r}.$$

Сила, с которой поле действует на проводник с током, равна произведению индукции поля на ток и на длину проводника: $F = BIl$ (глава III, § 78).

На основании этого можно написать, что магнитное поле тока I_1 действует на ток I_2 с силой, выражаемой формулой:

$$F=BI_2l, \text{ или } F=\mu\frac{I_1I_2}{2\pi r}l. \text{ Для вакуума: } F=\mu_0\frac{I_1I_2}{2\pi r}l.$$

Приведённая формула в системе единиц СИ взята за основу определения одной из основных единиц этой системы — единицы силы тока — ампера.

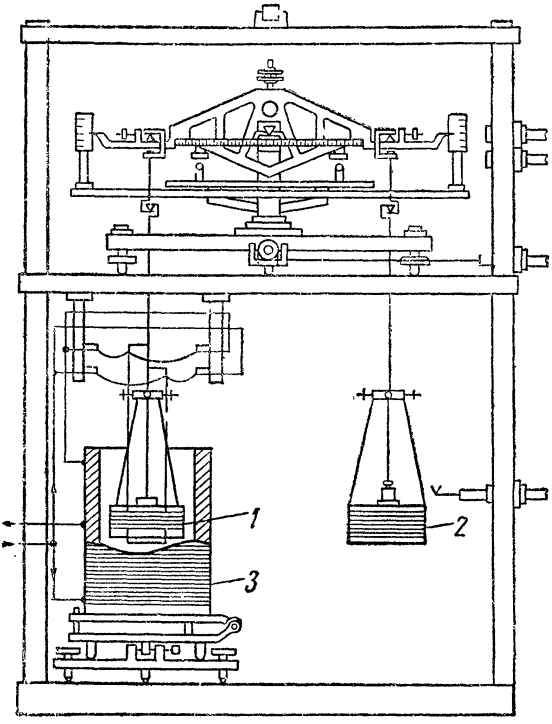


Рис. 20. Схема устройства ампер-весов.

Ампер — сила тока, который, проходя по каждому из двух бесконечно длинных параллельных проводников, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызывает силу взаимодействия между проводниками в $2\cdot10^{-7}$ ньютона на каждый метр длины.

При этом взаимодействующие проводники должны быть прямолинейными и ничтожно малого кругового сечения.

Для воспроизведения единицы силы тока — ампер — созданы так называемые ампер-весы.

Схема устройства весов изображена на рисунке 20. Два одинаковых соленоида *1* и *2* подвешены к плечам коромысла весьма чувствительных весов. Первый из них помещён (соосно) в неподвижный соленоид *3* и соединён с ним последовательно в электрическую цепь, питаемую от источника электрической энергии.

При включении цепи соленоиды *1* и *3* взаимодействуют так, что подвижный соленоид втягивается в неподвижный, равновесие весов нарушается. Для восстановления равновесия надо нагружать другое плечо (по рисунку 20 — правое) гирями, вес которых равен силе F, с которой токи в соленоидах взаимодействуют между собой. Вес этих гирь $P=mg$ пропорционален произведению токов в последовательно соединённых соленоидах, т. е. I^2. Поэтому

$$mg=kI^2,$$

где k — постоянная ампер-весов,

откуда

$$I=\sqrt{\frac{mg}{k}};$$

при $k=mg$, $I=1a$.

Точность измерений на этих весах порядка $10^{-5}-10^{-6}$ a.

Подставляя указанные в определении ампера значения величин, входящих в формулу взаимодействия двух параллельных проводников с током, найдём:

$$2\cdot 10^{-7}\ н=\mu_0\frac{1a\cdot 1a\cdot 1м}{2\pi\cdot 1м},$$

откуда

$$\mu_0=\frac{2\pi\cdot 2\cdot 10^{-7}н}{a^2}\approx 12{,}6\cdot 10^{-7}\frac{н}{a^2}.$$

Предоставляется самим учащимся показать, что

$$1\frac{н}{a^2}=1\frac{ом\cdot сек}{м}=1\frac{гн}{м}.$$

Итак, магнитная постоянная равна $12{,}6\cdot 10^{-7}\ \frac{гн}{м}$.

Упражнение.

1. Определить силу, действующую на прямолинейный проводник с током 15 a, длина которого 0,8 $м$, если он расположен на расстоянии 5 $см$ от другого прямолинейного весьма длинного провода, по которому течёт ток 12 a. Оба проводника расположены в вакууме параллельно один другому. (Ответ: $F\approx 5{,}8\cdot 10^{-4}$ $н$.)

2. Определить индукцию магнитного поля прямолинейного проводника, по которому течёт ток 10 a, в точке, отстоящей от проводника на расстоянии 5 $см$. Относительную магнитную проницаемость среды принять равной единице. (Ответ: $B\approx 10^{-5}\ \frac{вб}{м^2}$.)

3. Определить индукцию магнитного поля катушки, имеющей 4000 витков, если по катушке идёт ток 0,5 a, а длина её 40 $см$. Внутри катушки находится воздух. (Ответ: $B\approx 3{,}8\cdot 10^{-4}\ \frac{вб}{м^2}$.)

3. Напряжённость магнитного поля. Индукция магнитного поля — величина, характеризующая результирующее магнитное поле в намагниченном веществе. Это результирующее поле представляет сумму внешнего поля (например, поля тока) и внутреннего поля самого намагниченного вещества.

Наряду с индукцией магнитного поля для расчетных целей применяют величину, называемую напряжённостью магнитного поля.

Эта величина характеризует интенсивность намагничивающего (внешнего) магнитного поля.

Напряжённость поля прямо пропорциональна току, создающему магнитное поле.

В случае однородного замкнутого стального сердечника, на который равномерно наложена обмотка, обтекаемая током, напряжённость поля вычисляется по формуле:

$$H = nI,$$

где I — ток в амперах,

n — число витков обмотки, приходящихся на единицу длины катушки,

H — напряженность магнитного поля в $\frac{а}{м}$.

Напряжённость магнитного поля связана с магнитной индукцией следующей формулой

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

В системе СИ напряжённость поля измеряется в $\frac{а}{м}$:

$$\text{ед. } H = 1\frac{вб\ м}{м^2 \cdot гн} = 1\ \frac{в\ сек\ м}{м^2\ ом \cdot сек} = 1\ \frac{а}{м}.$$

Напряжённость магнитного поля — величина векторная. Вектор напряженности магнитного поля H в любой точке магнитного поля направлен по касательной к магнитной силовой линии, проходящей через данную точку.

Упражнение.

1. Каким должен быть ток в катушке имеющей 120 витков на 1 *см* длины, чтобы напряжённость поля в катушке была $500\frac{а}{м}$?

2 На каком расстоянии от прямого провода, по которому течёт ток 5 *а*, напряжённость поля равна $20\frac{а}{м}$?

4. Магнитные свойства вещества. Магнитные свойства вещества проявляются в его способности намагничиваться.

Опытное исследование магнитных свойств веществ, начатое ещё Фарадеем, показало, что все вещества обладают магнитными свойствами Причем у большинства из них магнитные свойства выражены слабо. Эти вещества получили название слабомагнитных в отличие от небольшой группы веществ (железо, никель, кобальт и специальные сплавы), называемых сильномагнитными.

Для исследования магнитных свойств вещества из него изготавливают небольшой стерженек (или, если вещество жидкое, наполняют им тонкую стеклянную трубку) и подвешивают его между полюсами электромагнита

Если испытуемый стерженек помещён в однородном поле, то действие поля на него сводится к определенной ориентации его в этом поле Причем на опытах было обнаружено, что стерженьки из одной группы веществ устанавливаются вдоль линий индукции поля, из другой — поперёк этих линий.

В неоднородном магнитном поле стерженьки, изготовленные из первой группы веществ, устанавливаясь вдоль линий поля, втягиваются в область более сильного поля, стерженьки же из другой группы веществ выталкиваются в область слабого поля.

Различие в поведении стерженьков объясняется тем, что одни из них (первая группа) намагничиваются в направлении линий индукции поля, другие — в противоположном направлении (рис. 21).

В случае слабомагнитных веществ первая группа веществ получила название парамагнитных, а вторая — диамагнитных веществ.

Рис 21 В однородном магнитном поле железный стержень устанавливается вдоль силовых линий поля, висмутовый — перпендикулярно силовым линиям поля.

Относительная магнитная проницаемость у парамагнитных веществ больше единицы ($\mu_r > 1$), у диамагнитных веществ меньше единицы ($\mu_r < 1$).

Ниже приводятся значения относительной магнитной проницаемости некоторых веществ.

Таблица относительных магнитных проницаемостей некоторых слабомагнитных веществ

Воздух	1,00000036	Парамагнитные вещества
Олово . . .	1,000004	
Алюминий . .	1,000023	
Платина . .	1,000364	
Висмут	0,999825	Диамагнитные вещества
Сурьма	0,999937	
Серебро	0,999981	
Медь	0,999991	

Относительная магнитная проницаемость вакуума, как это следует из её определения, равна единице.

Если внутрь соленоида внести стержень из какого-либо слабомагнитного вещества, то магнитное поле этого соленоида заметно не изменится, так как магнитная проницаемость этих веществ близка к единице.

Характерным свойством слабомагнитных веществ является то, что они бывают намагничены только тогда, когда находятся во внешнем магнитном поле.

Сильномагнитные вещества называются ферромагнитными (по названию важнейшего представителя этой группы веществ — железа).

Ферромагнитные вещества в магнитном поле ведут себя подобно парамагнитным веществам, но только они значительно сильнее намагничиваются.

Ниже приводятся предельные значения относительной магнитной проницаемости некоторых ферромагнитных веществ.

Ферромагнитное вещество	Относительная магнитная проницаемость
Кобальт	174
Никель	1120
Мягкая сталь	2180
Трансформаторная листовая сталь	7500
Сплав железа с никелем	60 000
Пермалой (Ni 78%; Fe 18%; Mo 3%; Mn 0,5%)	115 000

Отличительной особенностью ферромагнитных веществ является не только то, что магнитная проницаемость у них достигает очень большой величины, но и то, что она не является постоянной величиной, как у слабомагнитных веществ, а зависит от величины напряжённости намагничивающего поля.

Эта зависимость μ от H весьма сложная и у разных ферромагнитных веществ в деталях различна. Общий характер зависимости μ от H иллюстрирует рисунок 22.

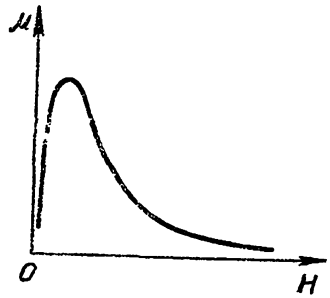


Рис 22 График зависимости магнитной проницаемости вещества от напряжённости намагничивающего поля

В слабых полях с увеличением напряжённости намагничивающего поля магнитная проницаемость ферромагнитных веществ быстро растёт и достигает максимума. При дальнейшем увеличении напряжённости магнитная проницаемость уменьшается и в полях большой напряжённости приближается к единице. Это происходит тогда, когда ферромагнитное вещество намагничивается до насыщения.

При достижении ферромагнитным веществом состояния магнитного насыщения рост индукции в этом веществе может происходить только за счёт увеличения напряжённости намагничивающего поля.

Достижение состояния магнитного насыщения присуще только ферромагнитным веществам. У слабомагнитных веществ магнитное насыщение не наблюдается.

Различие в магнитных свойствах слабомагнитных и ферромагнитных веществ наглядно отражено на кривых намагничива-

ния (рис. 23), которые выражают зависимость индукции в данном веществе от напряжённости намагничивающего поля.

5. Явление магнитного гистерезиса. Для намагничивания ферромагнитного вещества стержень из этого вещества вносят в катушку. При пропускании тока по ней стержень намагничивается. Причём с увеличением тока в катушке пропорционально ему растёт и напряжённость намагничивающего поля H внутри катушки, а это приводит ко всё большему намагничиванию стержня, т. е. к увеличению в нём магнитной индукции B.

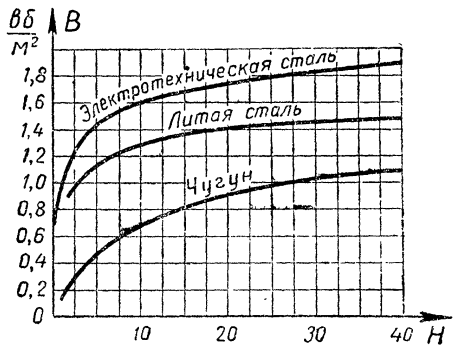


Рис. 23а. Кривые намагничивания различных ферромагнитных веществ.

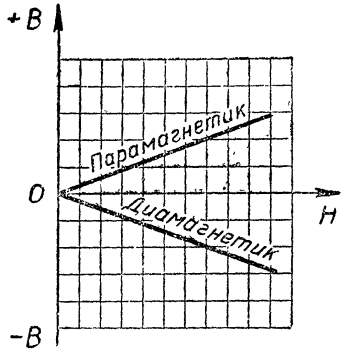


Рис. 23б. Кривые намагничивания парамагнетиков и диамагнетиков.

Графически процесс намагничивания стержня изобразится в виде кривой OA (рис. 24).

Начнём постепенно уменьшать напряжённость намагничивающего поля, уменьшая для этого ток в катушке. При этом магнитная индукция в стержне тоже станет уменьшаться. Но процесс размагничивания стержня пойдёт по пути, отличному от пути намагничивания, что графически изобразится не кривой AO, а кривой AB_0, т. е. *размагничивание стержня будет отставать от уменьшения напряжённости поля в катушке.*

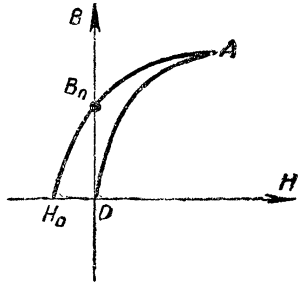


Рис. 24. Кривая намагничивания.

Это явление получило название гистерезиса.

Когда ток в катушке уменьшится до нуля и, следовательно, напряжённость намагничивающего поля в катушке станет равной нулю, стержень сохранит состояние намагничивания и индукция в нём не будет равна нулю. На графике эта остаточная индукция изобразится отрезком OB_0.

Для полного размагничивания стержня необходимо создать внутри катушки поле обратного направления, что легко осуществить, изменив направление тока в катушке.

Постепенно увеличивая напряжённость намагничивающего

поля H противоположного направления, можно довести до нуля магнитную индукцию в стержне.

На графике этот процесс изображается участком кривой B_0H_0. Отрезок OH_0 выражает величину напряжённости намагничивающего поля обратного направления, при которой происходит полное размагничивание стержня.

Величина этой напряжённости H_0 получила название коэрцитивной силы. Величина коэрцитивной силы характеризует «прочность» остаточного намагничивания ферромагнитного вещества.

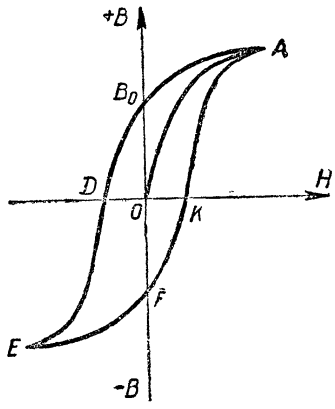


Рис. 25. Петля гистерезиса.

Как величина остаточного намагничивания B_0, так особенно и величина коэрцитивной силы H_0 у разных ферромагнитных веществ различны. Они являются важными характеристиками ферромагнетиков.

Вещества с малой коэрцитивной силой получили в технике название мягких ферромагнетиков.

Вещества с большой коэрцитивной силой называются жёсткими ферромагнетиками.

Жёсткие ферромагнетики незаменимы при изготовлении постоянных магнитов, в которых остаточная намагниченность должна быть по возможности максимальной, т. е. близкой к магнитному насыщению.

Мягкие ферромагнетики используются в тех случаях, когда материал должен во время работы аппарата или машины непрерывно перемагничиваться.

Продолжим рассмотрение явления, описанного в начале параграфа.

Увеличивая напряжённость поля H в новом направлении (рис. 25), можно довести намагничивание материала до насыщения, соответствующего точке E. Затем, размагничивая материал, при $H=0$ получим остаточное намагничивание, определяемое отрезком OF.

Если повторить весь цикл перемагничивания вещества, то процесс изменения магнитной индукции также повторится по замкнутой кривой AB_cDEFKA. Эта кривая называется петлей гистерезиса.

У мягких ферромагнетиков (с малой коэрцитивной силой) петля гистерезиса узкая, а у жёстких (или высококоэрцитивных ферромагнетиков) широкая.

Явление гистерезиса приводит к тому, что на перемагничивание веществ расходуется энергия. Причём, чем больше у данного вещества коэрцитивная сила, тем больше расходуется энергии на перемагничивание. Поэтому, например, сердечники

трансформаторов и генераторов переменного тока должны изготовляться из особых мягких ферромагнетиков. Металлургия выпускает для этой цели специальную магнитомягкую трансформаторную сталь.

Энергия, расходуемая на перемагничивание материала, превращается во внутреннюю энергию сердечника, который при этом нагревается. Нагревание же ухудшает магнитные свойства ферромагнитных веществ, а при достижении некоторой критической для данного ферромагнетика температуры его магнитные свойства исчезают. Ферромагнитное вещество при температуре выше критической ведёт себя как обычное парамагнитное вещество.

Критическая температура для ферромагнитных веществ называется точкой Кюри, по имени Пьера Кюри, открывшего её существование.

Точка Кюри у железа 769° К, у никеля 350° К.

Изучение законов намагничивания ферромагнитных материалов — одна из важнейших практических и теоретических задач. Первые крупные исследования в этой области были произведены русским учёным А. Т. Столетовым. Большой вклад в исследование свойств ферромагнитных материалов вложили советские учёные В. К. Аркадьев, Н. А. Акулов, Я. Т. Дорфман, С. В. Вонсовский и другие.

6. Применение магнитных материалов. Применение магнитных материалов в технике в настоящее время очень велико. Укажем на главнейшие из них.

Одним из основных потребителей магнитных материалов является электротехника. Огромное количество мягкого магнитного материала — трансформаторной стали — ежегодно расходуется на изготовление генераторов, электродвигателей и трансформаторов. Немалое количество ферромагнитных материалов идёт на изготовление электромагнитов, которые используются и в гигантских ускорителях ядерных частиц, и в мощных электромагнитных кранах, и в громкоговорителях, и в электроизмерительных приборах и т. д.

Чрезвычайно широко используются магнитные материалы в радиотехнических, радиоэлектронных устройствах, в автоматике и телемеханике.

Важное применение магнитные материалы получили в ультраакустике в качестве излучателей и приёмников ультразвука. Стержень из ферромагнитного вещества при его перемагничивании удлиняется или сжимается (магнитострикция), а при сжатии или растяжении изменяется его намагниченность. Это свойство и используется в устройстве магнитострикционных излучателей и приёмников ультразвука.

На явлении остаточного магнетизма в жёсткой ферромагнитной проволоке или в специально изготовленной магнитной ленте основан способ магнитной записи звука.

Схема магнитной звукозаписи показана на рисунке 26. Звуковые сигналы вызывают в электрической цепи соответствующие изменения электрического тока, которые, в свою очередь, вызывают изменение магнитного поля. На ленте при пересечении этого переменного магнитного поля звуковой частоты создаются участки неоднородной намагниченности, соответствующие записываемому звуку, и благодаря остаточному магнетизму звук «записывается».

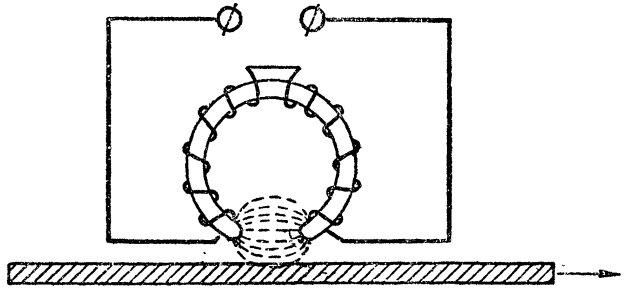


Рис. 26. Схема магнитной звукозаписи.

В связи с бурным развитием техники сверхвысокой частоты (СВЧ) разработан новый класс неметаллических полупроводниковых магнетиков, называемых ферримагнетиками, у которых электросопротивление во много (в 10^8—10^{20}) раз больше, чем у металлов и металлических сплавов. Вследствие этого при сверхвысокочастотном намагничивании в них не возникают сколько-нибудь заметные индукционные (вихревые) токи и связанные с ними вредные потери энергии. Одним из наиболее распространённых типов таких веществ оказались сложные металлические окислы с общей химической формулой $MeOFe_2O_3$, где Me — какой-нибудь из металлов: железо, никель, кобальт, марганец и др. Из этих веществ приготовляют мягкие полупроводниковые материалы — ферриты (или оксиферы), которые нашли необычайно широкое применение в современной технике СВЧ.

7. Природа магнитных свойств вещества. Первой попыткой объяснения магнитных свойств вещества была гипотеза Ампера о существовании внутри постоянных магнитов молекулярных токов, которые и создают поле магнита. (Гипотеза Ампера была изложена в главе III, § 79.)

Изучение строения атома и исследование свойств элементарных частиц раскрыло физическую сущность амперовских молекулярных токов и магнитных свойств веществ.

Каждый атом вещества — сложная система, состоящая из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него электронов. Движение электронов вокруг ядра представляет собой элементарный ток, создающий, как и всякий ток, магнитное поле.

Исследования показали, что магнитное поле атомов обусловлено не только движением электронов вокруг ядра, но главным

образом магнитными полями, которыми обладают сами электроны. Кроме этого, оказалось, что магнитными полями обладают и частицы, из которых состоят ядра атомов,— протоны и нейтроны.

Однако магнитное поле атома зависит не только от магнитных полей отдельных частиц, входящих в его состав, а также и от характера расположения и движения частиц в атоме. В атомах одних веществ магнитные поля могут, суммируясь, создать результирующее поле атома, в атомах других веществ такого результирующего поля может и не возникнуть.

Для того чтобы вещество оказалось намагниченным, необходима ещё и определённая пространственная ориентировка атомов и молекул, из которых состоит данное вещество.

Самопроизвольная ориентация магнитных полей атомов наблюдается лишь у ферромагнитных веществ. В ферромагнитных веществах были обнаружены небольшие области размером порядка 10^{-3} *мм*, в которых атомы расположены так, что их маг-

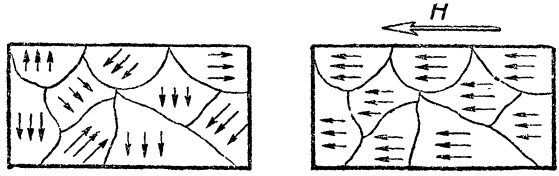


Рис. 27. а) Направление намагничивания в различных доменах различно; б) ориентировка намагниченных доменов в направлении внешнего поля.

нитные поля имеют одно и то же направление. В этих малых областях, называемых доменами, вещество намагничено до насыщения. Направление намагничивания в разных доменах различно (рис. 27, *а*), поэтому всё тело в отсутствие внешнего магнитного поля оказывается ненамагниченным.

Под действием внешнего магнитного поля происходит смещение границ отдельных доменов; увеличивается число доменов, в которых направление поля совпадает с направлением внешнего намагничивающего поля. Кроме того, происходит ориентировка намагниченных доменов в направлении внешнего поля (рис. 27, *б*).

В этом и заключается процесс намагничивания ферромагнитного вещества.

Гипотеза о существовании ферромагнитных доменов была высказана ещё в 1907 г. французским учёным П. Вейссом и доказана теоретически советскими учёными Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем в 1935 г.

Существование отдельных областей самопроизвольного (спонтанного) намагничивания — доменов — может быть непосредст-

венно обнаружено при рассмотрении под микроскопом отшлифованной поверхности ферромагнетика, покрытой тончайшим железным порошком. Этот порошок располагается по границам доменов. Такие опыты впервые проделали советские учёные Н. С. Акулов и М. В. Дегтяр.

У парамагнитных веществ атомы и молекулы обладают собственными магнитными полями. Под воздействием внешнего магнитного поля эти микрополя ориентируются преимущественно в направлении внешнего намагничивающего поля. С увеличением напряжённости внешнего поля H пропорционально ему увеличивается и индукция B, созданная в веществе микрополями. Тепловое движение молекул противодействует ориентации микрополей в направлении внешнего поля, поэтому в парамагнитных веществах не наблюдается намагничивания до насыщения.

Атомы диамагнитных веществ не имеют собственных магнитных полей. При возникновении в таких веществах внешнего магнитного поля они намагничиваются в направлении, противоположном внешнему полю. Объясняется это следующим.

Внешнее магнитное поле вызывает изменения в движении электронов внутри атомов, что, в свою очередь, приводит к возникновению магнитных полей атомов, направленных против внешнего поля (в соответствии с явлением электромагнитной индукции).

Итак, в магнитных свойствах вещества находит отражение его внутреннее молекулярно-атомное строение.

Детальное исследование магнитных свойств веществ позволяет физикам получить много данных о структуре вещества и свойствах элементарных частиц.

Дальнейшее изучение этих свойств расширит наши знания об окружающем нас мире.

8. Энергия магнитного поля катушки. Магнитное поле катушки обладает энергией. Такое заключение можно сделать из ряда опытов. Один из них описан в § 94. В этом опыте лампочку от карманного фонаря подключали в цепь источника тока параллельно с электромагнитом, обладающим большой индуктивностью. Так как напряжение источника было мало, то лампочка не светила, но при размыкании цепи лампочка ярко вспыхивала.

Свечение лампочки происходит во время размыкания цепи источника, следовательно, оно не связано с преобразованием энергии источника и происходит за счёт энергии индукционного тока, вызванного э. д. с. самоиндукции. Энергия же тока заключена главным образом в магнитном поле катушки с током. Следовательно, в момент размыкания цепи источника в лампочке происходит преобразование энергии, запасённой в магнитном поле катушки, в другие виды энергии. Как подсчитать энергию магнитного поля катушки?

Очевидно, что накопление энергии в магнитном поле проис-

ходит в момент замыкания цепи, так как в установившемся режиме, когда ток достигает постоянного значения, энергия магнитного поля не меняется, а источник расходует свою энергию лишь на поддержание постоянного тока и эта часть энергии превращается во внутреннюю энергию проводников (катушка нагревается).

В момент же нарастания тока в цепи от 0 до I источник совершает дополнительную работу против действующей в цепи э. д. с. самоиндукции, которая противодействует нарастанию тока. Энергия, запасённая в магнитном поле, будет равна этой работе источника.

Расчёты, выходящие за пределы курса средней школы, показывают, что величина энергии, запасённой в магнитном поле катушки, может быть рассчитана по формуле:

$$W=\frac{L\cdot I^2}{2},$$

где L — индуктивность катушки (§ 95).

IV. ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ IV «ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК»

1. Мощность в цепи переменного тока. В цепи постоянного тока мощность на каком-нибудь участке характеризует величину энергии электрического тока, которая превращается на этом участке в другие виды энергии за время, равное одной секунде. Величина этой мощности измеряется произведением напряжения на ток:

$$P=UI.$$

То же самое можно сказать и о мощности на каком-нибудь участке цепи переменного тока, если эта цепь не обладает ни индуктивностью, ни ёмкостью. Мощность на участке цепи переменного тока, обладающей активным сопротивлением, называется активной мощностью. Активная мощность характеризует величину энергии переменного тока, которая необратимо превращается за 1 секунду в другие виды энергии (во внутреннюю, механическую и др.). Единицей активной мощности является ватт (*вт*) или киловатт (*квт*).

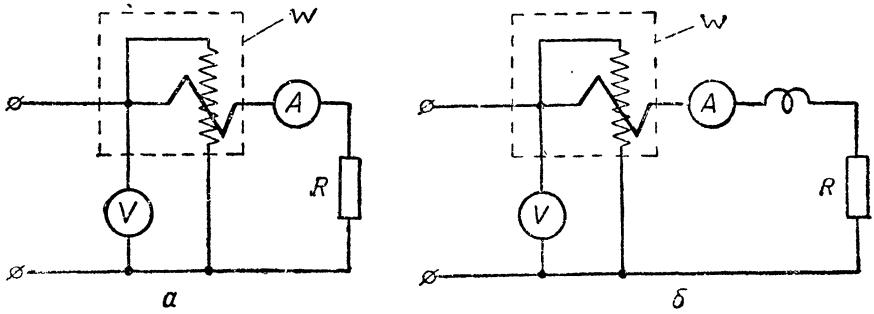
Обратимся к опыту. В цепь переменного тока включим проводник с активным сопротивлением. Напряжение при этом будем измерять вольтметром, ток — амперметром, а мощность — ваттметром (рис. 28, *а*).

Сравнивая показания ваттметра P с произведением UI, убеждаемся, что $P=UI$. Следовательно, активную мощность можно измерять непосредственно ваттметром или вычислять по показаниям вольтметра и амперметра.

Значительно сложнее решается вопрос о мощности в цепи переменного тока, если, кроме активного сопротивления, эта

цепь обладает ещё индуктивным или ёмкостным сопротивлением.

Включим в цепь переменного тока последовательно с активным сопротивлением катушку индуктивности (рис. 28, *б*). Показания ваттметра, соответствующие активной мощности в цепи, в этом случае оказываются меньше, чем произведение UI.



а *б*

Рис. 28. Схема для измерения мощности в цепи переменного тока.

Можно записать, что $P=kUI$ (1), где k — некоторый коэффициент, получивший название коэффициента мощности. Как показывают теоретические расчёты, коэффициент мощности k равен $\cos\varphi$, где φ — сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока. Введём значение k в формулу мощности (1), получим:

$$P=UI\cos\varphi.$$

Величина $UI=S$ получила название полной мощности. Полная мощность в цепи переменного тока измеряется вольтамперами (сокращённо *ва*) или киловольтамперами (*ква*). Итак, активная мощность в цепи переменного тока равна полной мощности, умноженной на $\cos\varphi$:

$$P=S\cos\varphi.$$

В общем случае (при наличии как активного, так и реактивного сопротивлений) в цепи переменного тока активная мощность меньше полной мощности, поэтому коэффициент мощности $\cos\varphi<1$. При активной нагрузке $\cos\varphi=1$; при чисто индуктивной или ёмкостной нагрузке цепи $\cos\varphi=0$ и $P_c=0$.

Чем выше коэффициент мощности, тем лучше используется генератор и сеть. Поэтому необходимо стремиться увеличить коэффициент мощности цепей, питаемых переменным током.

Необходимость увеличения $\cos\varphi$ потребителя энергии видно на следующем примере.

Допустим, что на электростанции установлен генератор переменного тока мощностью 240 *ква*. Напряжение на зажимах генератора 1200 *в*. Ток, который может установиться в сети, будет равен:

$$I=\frac{S}{U}=\frac{240000}{1200}=200\ (a).$$

Если к генератору подключить нагрузку, имеющую только активное сопротивление (например, электрические лампы накаливания и электронагревательные приборы), то $\cos\varphi=1$ и активная мощность $P=UI\cos\varphi=1200\cdot200\cdot1=240\,000=240$ (*квт*). В этом случае энергия генератора используется полностью.

Если же подключить к этому генератору нагрузку, имеющую $\cos\varphi=0{,}5$ (включить потребители с активным и индуктивным сопротивлением), то активная мощность в сети будет: $P=1200\cdot200\times\times0{,}5=120\,000$ *вт* $=120$ *квт*. Следовательно, хотя по обмоткам генератора и подводящим к потребителю проводам будет проходить прежний ток, но активная мощность уменьшится. Низкий коэффициент мощности приводит к уменьшению к. п. д. генераторов.

Увеличение $\cos\varphi$ в цепях, потребляющих переменный ток, представляет собой важную и довольно сложную задачу энергетики.

V. ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ V «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

1. Свойства электромагнитных волн. Свойства электромагнитных волн можно изучать с помощью установки, состоящей из передатчика — генератора сверхвысоких частот, дающего электромагнитные волны длиной в несколько сантиметров ($f=10\,000$ *Мгц*), и приёмника этих волн. С приёмника сигнал передаётся на усилитель, а после усиления — на динамик. Это позволяет принять сигнал на слух.

Если между передатчиком и приёмником на пути распространения электромагнитных волн поместить металлический лист, то приём радиосигналов исчезает.

Этот опыт показывает, что проводники не пропускают электромагнитные волны.

Диэлектрики же (например, стеклянный лист) пропускают электромагнитные волны и лишь только незначительно уменьшают их интенсивность.

Электромагнитные волны отражаются от проводников. При прохождении же через призму, изготовленную из какого-нибудь диэлектрика, они изменяют направление своего распространения, т. е. преломляются.

Пользуясь коротковолновыми передатчиком и приёмником, можно наблюдать явление интерференции и дифракции электромагнитных волн.

Таким образом, электромагнитные волны обладают свойствами, характерными для волн разной природы: звуковых, световых и др.

Свойства электромагнитных волн отражаться, преломляться,

интерферировать используются в различных радиотехнических устройствах. С этими свойствами связаны и особенности распространения различных электромагнитных волн. Так, длинные электромагнитные волны распространяются в основном вдоль земной поверхности и сильно ею поглощаются. Если же длинные волны направляют под углом к земной поверхности, то они уходят в мировое пространство и на землю не возвращаются. Короткие электромагнитные волны ещё сильнее поглощаются земной поверхностью, но зато они отражаются от имеющихся на больших высотах ионизированных слоёв атмосферы и возвращаются после этого на землю. Этим и объясняется возможность связи на коротких волнах на очень большие расстояния при малых мощностях радиостанций. Но связь на коротких волнах не столь устойчива, как на длинных волнах, так как условия отражения волн всё время меняются. Ультракороткие волны не огибают крупных препятствий, и связь на них может быть осуществлена лишь в том случае, когда между передатчиком и приёмником нет никаких препятствий, способных отразить волны и изменить направление их распространения.

Упражнение.

1. Вычислите длину электромагнитной волны, излучаемой линией электропередачи тока промышленной частоты. (Ответ: $\approx 6 \cdot 10^6$ *м*.)
2. Объясните, почему при связи на коротких волнах возможно образование зон молчания.
3. Радиоприёмник рассчитан на приём электромагнитных волн длиной от 25 до 2000 *м*. Определите наибольшую и наименьшую частоты колебаний, соответствующих этим волнам. (Ответ: $f_{\text{наим}} \approx 1{,}5 \cdot 10^5$ *гц*; $f_{\text{наиб}} \approx 1{,}2 \cdot 10^7$ *гц*.)

2. Применение токов высокой частоты. Высокочастотные колебания в основном применяются для радиосвязи, причём эти применения расширяются.

Токи высокой частоты нашли применения в промышленности, в медицине и в других областях практической деятельности человека.

Ток высокой частоты в отличие от постоянного тока течёт преимущественно по поверхности проводника. Это явление получило название «поверхностного эффекта».

Глубина проникновения тока в металл зависит от частоты тока, от удельного сопротивления металла и его магнитной проницаемости. Так, при частоте 50 *гц* проводящий слой в медном проводнике имеет толщину 10 *мм*, при частоте 500 000 *гц* (500 *кгц*) — 0,1 *мм*, а при частоте 150 000 000 *гц* (150 *Мгц*) — только 0,006 *мм*.

Поверхностный эффект используется для термической обработки стальных изделий.

В различных двигателях и машинах требуются детали с очень твёрдой поверхностью (они хорошо противостоят поверхностному износу, стойко переносят толчки и удары). Однако создание деталей с подобными свойствами при обычных спосо-

бах нагрева было делом чрезвычайно сложным, а часто и совершенно невозможным, так как деталь успевала прогреваться вся и после закалки становилась хрупкой.

При высокочастотной закалке деталь помещают внутрь витка с током высокой частоты. Переменное магнитное поле индуктирует в металлической детали высокочастотный ток. При достаточной мощности тока поверхность детали за чрезвычайно короткое время (секунды) разогревается до высокой температуры. Если после выключения тока деталь быстро охладить, то она закалится, но только по поверхности, внутренняя часть детали остаётся незакалённой, т. е. мягкой.

В промышленности для плавки стали применяют индукционные печи, нагрев в которых производят токами высокой частоты. В последнее время токами высокой частоты осуществляют сварку пластмасс.

Высокочастотные генераторы используют также для сушки керамических изделий, древесины и т. д. Нагрев деревянных и других изделий производится не в переменном магнитном поле индуктора, а в переменном электрическом поле конденсатора. Отдельные атомы, ионы и молекулы диэлектрика приходят в колебательное движение в такт с электрическим полем. Эти вынужденные колебания и вызывают нагревание диэлектрика. Электрическое поле свободно проникает во всю толщу диэлектрика и производит равномерный его нагрев. Вода, находящаяся в порах диэлектрика, быстро вскипает и в виде пара выходит наружу.

Высокочастотный нагрев находит применение и в медицине. При некоторых заболеваниях внутренних органов человека очень важно их сильно прогреть. Это и делается с помощью токов высокой частоты.

VI. ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ XI «СТРОЕНИЕ АТОМА»

1. Установки для получения частиц с большой энергией. Установки для получения частиц с большой энергией получили название ускорителей.

Чтобы сообщить частицам большую энергию, их можно разгонять, например, в электростатическом поле высокого напряжения, порядка нескольких миллионов вольт. На этом принципе были основаны первые ускорители. В настоящее время в основном применяется ускорение заряженных частиц в переменном электрическом поле. Осуществляется это в ускорителях различного рода — линейных и циклических.

Простейшая схема линейного ускорителя представлена на рисунке 29. В вакуумной трубке помещён источник заряженных частиц *1*, ускоряющий электрод *2* и трубчатые электроды *3*, *4*, *5* и *6*. На эти электроды от специального генератора подают высокочастотное переменное напряжение.

В случае ускорения электронов на электрод *2* подаётся положительный потенциал относительно источника частиц *1*, а в случае ускорения положительных ионов — отрицательный потенциал. Ускоряемые в этом электрическом поле заряженные частицы после пролёта внутри электрода *2* попадают в пространство между электродами *2* и *3*, к которым приложено высокочастотное напряжение. Под действием этого поля заряженные частицы ещё ускоряются и входят в трубчатый электрод *3*. Промежуток между электродами *2* и *3* заряженные частицы проходят за время, равное половине периода колебаний высокочастотного

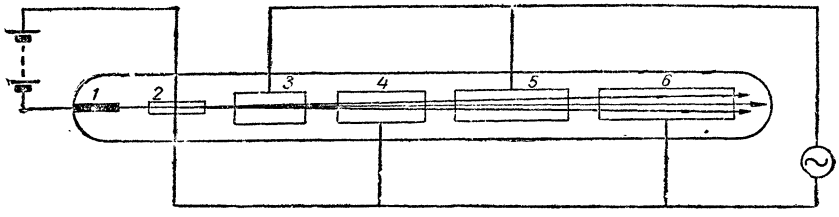


Рис. 29. Схема линейного ускорителя.

напряжения, подводимого к электродам *3, 4, 5* и *6*. Через половину периода поле между электродами *2* и *3* меняет своё направление на обратное и должно было бы тормозить частицы. Но пока поле имеет такое (обратное) направление, заряженная частица движется внутри электрода *3* без ускорения, по инерции. Ко времени, когда частица попадает в промежуток между электродами *3* и *4*, электрическое поле вновь изменяет направление и частица ускоряется этим полем. При прохождении частицей следующих промежутков (*4—5* и *5—6*) все процессы повторяются.

Таким образом, в линейном ускорителе частицы движутся через ускоряющие промежутки в такт с изменением в них электрического поля и в каждом из этих промежутков ускоряются. Применяя большое число электродов в линейном ускорителе, удаётся получить заряженные частицы с очень высокими энергиями.

Для получения положительных ионов с большой энергией чаще применяются циклические ускорители — *циклотроны*. Действие этих установок также основано на многократном ускорении частиц, но частицы в них движутся не прямолинейно, а по спирали.

Главной частью циклотрона является очень большой электромагнит, между полюсами которого создаётся сильное однородное магнитное поле. В рабочей камере, где находится электромагнит, создан высокий вакуум.

Если в магнитное поле электромагнита попадёт заряженная частица, обладающая некоторой начальной скоростью,

перпендикулярной к направлению силовых линий поля, то она будет описывать в этом поле окружность. Радиус этой окружности пропорционален скорости частицы.

В рабочей камере циклотрона между полюсами электромагнита помещена плоская круглая коробка, разрезанная по диаметру на две части D_1 и D_2 (рис. 30), между которыми оставлена щель. Части коробки имеют форму латинской буквы D, поэтому и получили название «дуанты». Дуанты служат ускоряющими электродами: между ними с помощью высокочастотного генератора создаётся переменное напряжение от 30 000 до 100 000 *в*.

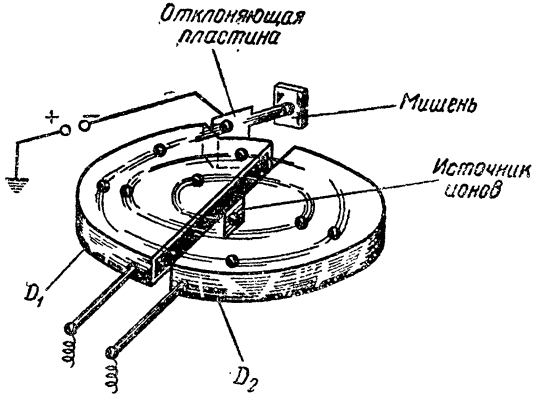


Рис. 30. Схема камеры циклотрона.

Частота изменений напряжённости этого поля такова, что она соответствует времени одного полного оборота частицы в магнитном поле.

В щели между дуантами, вблизи центра камеры, помещают источник ионов.

Внутри дуант электрического поля нет, ионы там движутся по инерции. Магнитное же поле электромагнита, силовые линии которого направлены перпендикулярно скорости движения ионов, не изменяет их скорости, а только искривляет их траектории, вынуждая их описывать окружности.

Допустим, что вблизи средней точки дуант появились положительные ионы в тот момент, когда левая дуанта D_1 имеет максимальный отрицательный потенциал. Под действием электрического поля ионы сместятся к этой дуанте и проникнут внутрь неё. Под действием же магнитного поля ионы опишут в дуанте полуокружность. Через промежуток времени $\frac{T}{2}$ (T — период изменения напряжения между дуантами) ионы снова окажутся между дуантами. Таким образом, они достигнут щели между дуантами к тому моменту, когда напряжение станет таким же по величине, как при первом ускорении, но будет противоположно по направлению. Так как ионы теперь движутся через щель также в противоположном направлении (внутрь правой дуанты D_2), то они вновь ускорятся и энергия их увеличится. Затем они, двигаясь в правой дуанте, опишут новую полуокружность, несколько большего радиуса (так как скорость их увеличилась), и окажутся между дуантами в тот момент, когда напряжение станет равным первоначальному. Ионы испытают новое ускорение, энергия их увеличится и т. д.

Этот процесс повторяется многократно, энергия ионов всё больше возрастает, ионы всё ближе подходят к наружным стенкам дуант, двигаясь по спирали. После сотни последовательных оборотов ионы, накопив значительную кинетическую энергию, приближаются к боковым стенкам дуант. На выходе из дуанты помещают отклоняющую пластинку, к которой приложено постоянное напряжение, порядка нескольких десятков тысяч вольт. Пучок ускоренных ионов отклоняется и выходит из дуант в камеру, где расположена мишень.

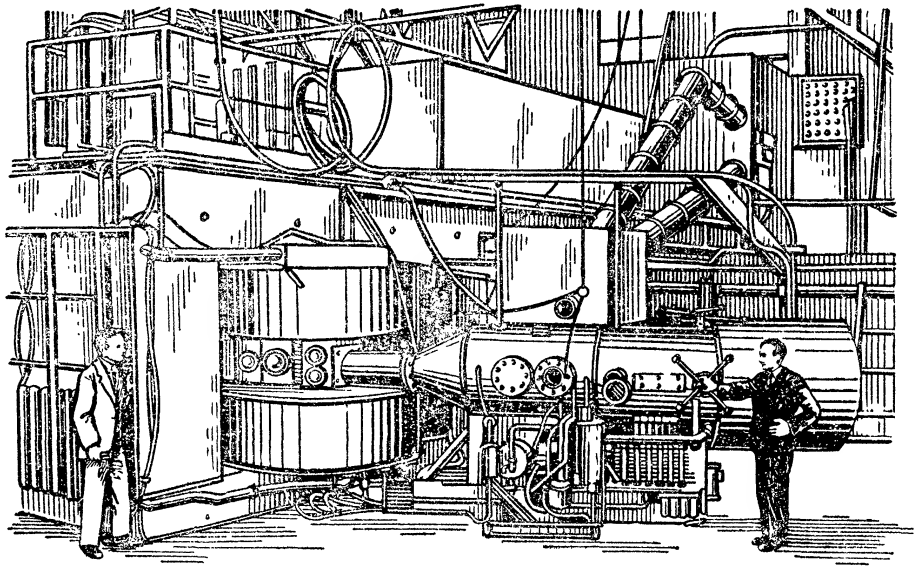


Рис. 31. Внешний вид циклотрона.

Таков принцип действия циклотрона. При помощи циклотрона можно получать примерно $9 \cdot 10^{13}$ частиц в секунду с энергией до 100 *Мэв*. Для сравнения укажем, что 1 *г* радия испускает в секунду $3{,}7 \cdot 10^{10}$ α-частиц с энергией 4,7 *Мэв*.

Циклотрон применяется для ускорения тяжёлых частиц: протонов, α-частиц, ионов атомов. Но он не применим для ускорения электронов, так как в этом случае очень сильно сказывается увеличение массы электронов при увеличении скорости их движения.

Внешний вид циклотрона изображён на рисунке 31.

В 1944 г советский физик В И. Векслер усовершенствовал принцип действия простейшего циклического ускорителя — циклотрона. В настоящее время получают частицы с энергией в миллиарды электрон-вольт. В Объединённом институте ядерных исследований в г. Дубне (близ Москвы) построен мощный ускоритель — синхрофазотрон, позволяющий получить частицы с энергией 10 *Бэв* (10^{10} *эв*).

Приведём некоторые данные об этом сооружении: электромагнит синхрофазотрона имеет наружный диаметр 72 *м*, вес электромагнита с обмотками — 36 000 *Т*, объём вакуумной камеры — 160 $м^3$, частица до получения расчётной энергии 10^{10} *эв* делает 4,5 миллиона оборотов, проходя путь около 1 миллиона *км*; для питания электромагнита требуется ток 12 800 *а*.

2. Энергия связи. Дефект масс. Атомная энергия. Для того чтобы разбить ядро на протоны и нейтроны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, необходимо сообщить ядру энергию. Наоборот, при соединении этих частиц выделяется энергия. По закону сохранения энергии выделяющаяся энергия равна той энергии, которую нужно сообщить ядру, чтобы разбить его на протоны и нейтроны. Эта энергия называется энергией связи. Очевидно, чем больше величина энергии связи, тем устойчивее ядро.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра?

Наиболее простой путь определения энергии связи атомных ядер основан на одном замечательном законе природы, устанавливающем соотношение между массой тел и их энергией. Закон этот был открыт знаменитым учёным Эйнштейном.

Согласно этому закону, ***изменение массы тела влечёт за собой изменение энергии этого тела.***

Если Δm — изменение массы некоторого тела, а ΔE — изменение его энергии, то связь между этими величинами выразится равенством:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2},$$

где c — скорость света $\left(3 \cdot 10^{10} \frac{см}{сек}\right)$.

Из формулы видно, что ничтожно малому изменению массы тела соответствует значительное изменение энергии. Подсчитаем, например, какое количество энергии выделится при уменьшении массы какого-нибудь тела на 1 *г*. По уравнению $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ найдём, что в этом случае $\Delta E = 0{,}001 \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{кгм^2}{сек^2} = 9 \cdot 10^{13}$ *дж*. Такое количество энергии выделяется при полном сгорании 3000 *т* угля.

Какое же отношение имеет рассмотренный нами закон к подсчёту энергии связи атомных ядер?

При образовании ядер из протонов и нейтронов освобождается энергия электромагнитного излучения, излучаются фотоны. Энергия ядерной системы уменьшается. Это явление должно вести за собой уменьшение массы, так как излученные фотоны уносят с собой некоторую часть её. Масса получившегося ядра, таким образом, должна быть меньше суммы масс, входящих в ядро протонов и нейтронов. Эту разность масс называют

дефектом массы ядра. Наличие дефекта масс подтверждается опытом.

Атомные массы принято выражать в атомных единицах массы (сокращённо а. е. м.). За единицу атомной массы принимают $^1/_{16}$ часть массы атома кислорода. Абсолютная величина единицы атомной массы равна $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ *г*.

Изменению массы на одну единицу атомной массы соответствует изменение энергии в 931 *Мэв*.

Масса протона $m_p = 1{,}00813$ а. е. м., масса нейтрона $m_n = 1{,}00895$ а. е. м. Сумма этих масс равна 2,01708 а. е. м.

При соединении атома водорода с нейтроном образуется дейтерий, масса которого 2,0147 а. е. м. Таким образом, масса атома дейтерия меньше суммы масс его составляющих на 0,00238 а. е. м., т. е. дефект массы равен 0,00238 а. е. м. Такому дефекту массы соответствует выделенная с фотоном энергия $931 \cdot 0{,}00238 = 2{,}2$ *Мэв*, что и подтверждается непосредственным опытом. Такую же энергию, как показывает опыт, нужно затратить, чтобы разбить ядро атома дейтерия на протон и нейтрон. Таким образом, энергия связи ядра дейтрона будет 2,2 *Мэв*.

Дефект массы характеризует энергию связи атомного ядра.

Подсчитаем энергию связи ядра гелия (α-частицы). Ядро гелия состоит из 2 протонов и 2 нейтронов. Сумма масс этих частиц равна $1{,}00813 \cdot 2 + 1{,}00895 \cdot 2 = 4{,}03416$ а. е. м., а масса ядра гелия — 4,00280 а. е. м. Дефект массы, таким образом, равен:

$$\Delta m = 4{,}03416 - 4{,}00280 = 0{,}03 \text{ а. е. м.}$$

Этой массе соответствует энергия 28 *Мэв*, которая и представляет собой энергию связи ядра гелия.

Рассчитывая подобным образом энергию связи ядра лития, найдём, что она равна 39 *Мэв*.

Эту энергию обычно принято называть ядерной или атомной энергией.

Так как ядерные силы очень велики, то при их высвобождении, т. е. при ядерных превращениях, выделяется огромное количество энергии. Так, при разложении, например, 1 *г* лития протонами выделилась бы энергия, равная 12 500 000 *дж*, что соответствует количеству теплоты, выделяющемуся при сгорании 8 *т* угля.

Упражнение.

1 Найти изменение энергии (в *Мэв*), соответствующее изменению массы на одну атомную единицу массы.

2. Энергия связи ядра лития 39 *Мэв*. Вычислить соответствующий этой энергии дефект масс.

3. Ядерный реактор. Самая важная область применения внутриядерной энергии — превращение её в электрическую энер-

гию. Это превращение происходит на атомных электростанциях, существенной частью которых является ядерный реактор.

В ядерном реакторе применяют природный уран, а не изотоп его $_{92}U^{235}$, дающий при определённых условиях цепную реакцию в виде взрыва. Нейтроны, получающиеся при делении ядер $_{92}U^{235}$, в природном уране могут встретить на своём пути как ядра урана-235, так и ядра урана-238.

Как показали исследования, изотоп урана с массовым числом 235 делится в основном медленными нейтронами. При этом выделяется большое количество энергии, а также новые нейтроны, необходимые для осуществления цепной реакции. Изотоп урана с массовым числом 238 поглощает быстрые нейтроны.

Поскольку в природном уране атомов урана-238 намного больше, чем атомов урана-235, то довольно значительная часть нейтронов будет неизбежно поглощаться ядрами урана-238. Для продолжения же реакции деления необходимо, чтобы из всех нейтронов, получившихся в результате деления ядра урана-235, хотя бы один попал в другое ядро урана-235. Поэтому, чтобы уменьшить захват нейтронов ядрами урана-238, на пути нейтронов ставят замедлители. При соударениях с атомами замедлителя нейтроны уменьшают свою энергию. Замедлителями для нейтронов могут быть вещества, состоящие из лёгких атомов, например: углерод (графит), тяжёлая вода, бериллий.

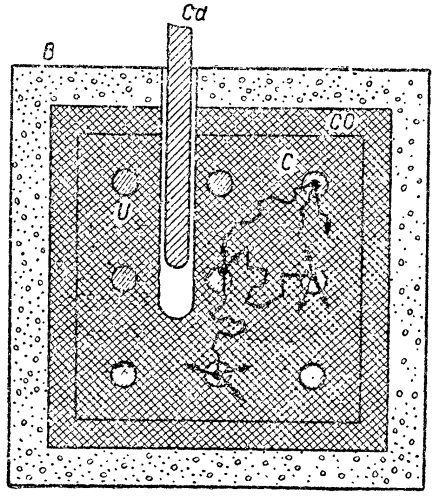


Рис. 32. Схема ядерного реактора:
U — урановые стержни; *C* — графит очень высокой чистоты; *B* — бетонная защита от радиоактивных излучений; *Cd* — кадмиевый стержень или система стержней.

Схема ядерного реактора с замедлителем-графитом дана на рисунке 32.

Работа такого реактора происходит следующим образом. Ядра атомов урана-235 делятся, вследствие чего выделяется энергия и вылетают новые нейтроны. Вылетевшие из ядра урана-235 нейтроны сталкиваются с ядрами атомов углерода (графита) и замедляются.

Для того чтобы затруднить вылет нейтронов за пределы реактора, вокруг его активной зоны, т. е. зоны, где расположен уран, устраивается отражатель *CO* (в данном случае графитовая оболочка).

После многократных столкновений с ядрами углерода нейтроны возвращаются в активную зону реактора и рано или

поздно встречаются с ядрами атомов урана-235, производят деление этих ядер.

При некоторых условиях цепная реакция в реакторе развивается настолько быстро, что если при этом её не ограничивать, то может произойти катастрофа. Чтобы этого не произошло, применяют регуляторы. В качестве регуляторов используют стержни из веществ, очень сильно поглощающих нейтроны (кадмий, бор). На схеме показан один из таких стержней. Поднимая и опуская эти стержни, можно регулировать скорость реакции. Для обеспечения безопасности имеется и аварийный стержень, который при необходимости автоматически опускается в реактор и, интенсивно поглощая нейтроны, прекращает цепную реакцию.

При делении ядер урана-235 выделяется внутриядерная энергия и температура в реакторе повышается. Графитовые блоки реактора охлаждаются водой, газом (водородом, гелием) или жидкими металлами, например натрием.

Эти вещества, нагреваясь, поступают в специальные устройства, где передают энергию воде, превращая её в пар, который приводит в движение турбины электростанций или применяется для других нужд.

4. **Атомная электростанция.** Начало атомной энергетике было положено 27 июня 1954 г. пуском в Советском Союзе первой атомной электростанции мощностью 5000 *квт*. Сооружение первенца атомной энергетики явилось триумфом отечественной науки и техники, результатом громадного труда учёных, инженеров и рабочих нашей страны. В настоящее время в СССР продолжается работа по созданию атомных электростанций. Так, например, завершается строительство двух мощных электростанций, работающих на ядерном топливе (Белоярская имени И. В. Курчатова и Ново-Воронежская).

В первой атомной электростанции Академии наук СССР применён уран-графитовый реактор, окружённый слоем воды (толщиной 1 *м*) и бетона (3 *м*). Внутри реактора размещены стальные тонкостенные трубки (общей длиной до 7 *м*), по которым протекает дистиллированная вода. При работе реактора вода нагревается до 260—270° С под давлением 100 *атм* (при данном давлении вода не доведена до кипения). Далее вода поступает в теплообменник, где отдаёт часть своей внутренней энергии воде второго контура, и с помощью насоса вновь поступает в реактор. Вода второго контура в теплообменнике превращается в пар, который поступает в паровую турбину. Турбина приводит в движение электрический генератор. Второй контур также замкнут: после турбины пар попадает в конденсатор, где превращается в воду, затем очищается от примесей и после этого очищенная вода вновь поступает в теплообменник. Направление движения воды в контурах таково, что в теплообменнике вода обоих контуров движется навстречу друг другу.

Разделение контуров воды необходимо из-за того, что в первом контуре вода при прохождении через реактор становится радиоактивной. Во втором же контуре вода и пар не обладают радиоактивностью, поэтому у турбины и других сооружений станции нет радиоактивных излучений.

Принципиальная схема паросиловой установки с атомным котлом изображена на рисунке 33.

Расход ядерного горючего на станции за сутки составляет 30 *г* урана (на обычной станции такой же мощности потребляется примерно 100 *т* угля в сутки), паропроизводительность станции — 40 *т* пара в час, коэффициент полезного действия — 15—17%.

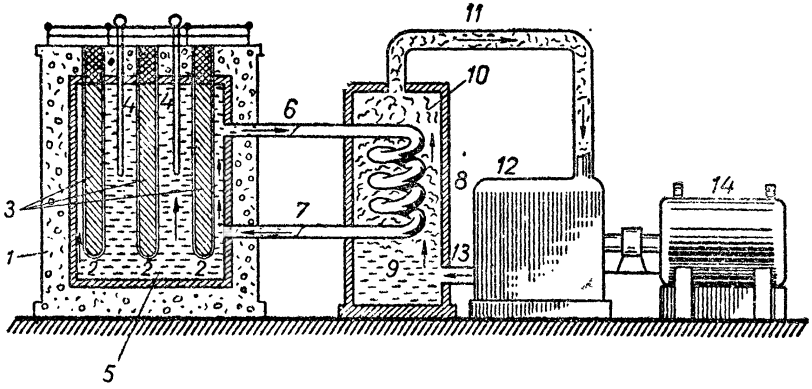


Рис. 33. Принципиальная схема атомной электростанции:

1 — бетонная защита атомного реактора; *2—3* — урановые стержни-блоки; *4* — аварийные стержни; *5* — вода первого контура; *6—7* — трубопровод; *8* — теплообменник; *9* — вода и *10* — пар второго контура; *11—13* — трубопровод; *12* — паровая турбина; *14* — электрический генератор.

5. Перспектива развития ядерной энергетики в СССР в свете задач, поставленных Программой КПСС. Современную науку о строении атома называют атомной и ядерной физикой. Атомная физика охватывает вопросы строения атома (электронные оболочки, взаимодействие атомов), а ядерная физика — строение ядер атомов и ядерные реакции.

Атомная и ядерная физики — молодые науки, но и теперь уже их открытия положены в основу чрезвычайно важных практических применений (ядерная энергетика, применение радиоактивных изотопов и т. п.). А как широки перспективы, которые открываются в процессе дальнейшего развития этих наук!

В развитии современной науки об атоме и его ядре велика роль советских учёных И. В. Курчатова, Л. А. Арцимовича, Д. В. Скобельцина, С. Н. Вернова, Д. Д. Иваненко и других.

Все достижения советской науки дали возможность нашим учёным, инженерам, техникам и рабочим создать первую в мире атомную электростанцию, первый в мире атомный ледокол, до-

биться других крупнейших успехов в использовании атомной энергии в мирных целях.

В последнее время возникла новая, бурно развивающаяся область физики — физика элементарных частиц. В этой области колоссальное значение имеет дальнейшее развитие физики и техники ускорителей заряженных частиц.

Как уже говорилось, очень большие научно-исследовательские работы проводятся в СССР по управляемым термоядерным реакциям. Созданы первые советские установки для получения управляемых термоядерных реакций. Успешное решение этой задачи даст человечеству практически неисчерпаемый источник энергии.

Успехи в развитии ускорительной техники, в ядерной энергетике, в исследованиях по созданию управляемых термоядерных реакций дают все основания утверждать, что в Советском Союзе атомная энергия будет всё шире и шире применяться для решения грандиозных задач мирного строительства и что в ближайшее время мы будем свидетелями ещё более грандиозных и необычных открытий.

В Программе КПСС, принятой на историческом XXII съезде Коммунистической партии Советского Союза, в числе всех задач, стоящих перед нашим народом по созданию материально-технической базы коммунизма, записано: «По мере удешевления производства атомной энергии развернётся строительство атомных электростанций, особенно в районах с недостатком других источников энергии, расширится применение атомной энергии в мирных целях в народном хозяйстве, медицине, науке».

Такие грандиозные перспективы развития науки и ядерной энергетики возможны только в Советском государстве, а решение таких задач под силу только советскому народу, строящему коммунистическое общество.

«Коммунизм обеспечивает непрерывное развитие общественного производства и повышение производительности труда на основе быстрого научно-технического прогресса, вооружает человека самой совершенной и могущественной техникой, поднимает на огромную высоту господство людей над природой, даёт возможность всё больше и полнее управлять её стихийными силами. Достигается высшая ступень планомерной организации всего общественного хозяйства, обеспечивается наиболее эффективное и разумное использование материальных богатств и трудовых ресурсов для удовлетворения растущих потребностей членов общества» (Программа КПСС).

VII. ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

1. Взаимосвязь физики и техники. Физика играет огромную роль в развитии техники. В технике используют законы природы, открытые физикой; в машиностроении — законы механи-

ческих явлений; в теплотехнике — законы тепловых явлений; в электротехнике и радиотехнике — законы электрических и магнитных явлений; в ядерной технике — законы физики атомного ядра.

История науки и техники раскрывает глубокую связь физики и техники. *Физические открытия нередко служили толчком к коренным изменениям в технике и даже к возникновению новых отраслей её.*

Так, открытие в XVII в. Галилеем и Гюйгенсом законов колебаний маятника преобразовало часовое дело. Открытие атмосферного давления привело к изобретению первых паровых машин. Открытие Фарадеем электромагнитной индукции привело к возникновению электротехники. Предсказанные теоретически Максвеллом и открытые экспериментально Герцем электромагнитные волны были применены А. С. Поповым для беспроволочной связи, что явилось началом радиотехники. Открытие деления нейтронами ядер урана привело к возникновению ядерной техники.

В свою очередь, и *техника выдвигает перед физикой новые задачи и даёт физике необходимые технические средства для новых всё более сложных экспериментов.*

Было время, когда техника в своём развитии опережала физику. Так, люди пользовались рычагом, не зная закона его действия, открытого Архимедом в III в. до н. э. Точно так же строители судов использовали на практике закон Архимеда задолго до его открытия. Средневековые мастера очков шлифовали оптические стёкла, не зная законов преломления света. Таким образом, практические потребности вынуждали людей использовать ещё непознанные законы природы и выдвигать перед наукой задачу познания этих законов. Но такое развитие техники без надлежащего научного обоснования возможно было тогда, когда техника могла опираться только на повседневный практический опыт людей.

По мере развития общества, общественного производства и науки техника всё более и более усложняется и нуждается в научном обосновании.

Теплотехника и электротехника уже во второй половине XIX столетия широко использовали законы тепловых и электромагнитных явлений для расчётов паровых машин, паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания, генераторов электрического тока и электродвигателей. Радиотехника и электроника требуют ещё более глубокого научного обоснования и, в свою очередь, ставят перед наукой новые задачи.

Открытия в физике XX в. привели к таким глубоким изменениям в науке и технике, что ныне говорят о ***научно-технической революции.*** Это прежде всего относится к открытиям в области электронной и атомной физики. Изучение электронных явлений привело к использованию законов движения электронов

в электронных лампах, фотоэлементах, электронно-лучевых трубках, что вызвало революцию в радиотехнике и привело к возникновению автоматики и телевидения. Автоматизация же производства позволяет повысить производительность промышленных предприятий и значительно облегчить труд рабочих.

Развитие вакуумной и полупроводниковой электроники вызвало к жизни создание новых машин, выполняющих сложные логические операции, заменяющие уже не руки, а в ряде случаев мозг человека. Возникла новая область науки и техники — кибернетика.

Открытия в области атомной и ядерной физики увенчались практическим использованием ядерной энергии. Построенная в СССР в 1954 г. первая в мире атомная электростанция открыла эру мирного использования атомной энергии. На очереди встал вопрос об использовании в мирных целях управляемых термоядерных реакций.

«Управляемая термоядерная реакция,— говорил на XX съезде КПСС выдающийся советский физик академик И. В. Курчатов,— должна позволить получать энергию не за счёт её запасов, содержащихся в атомных ядрах редких элементов урана и тория, а за счёт образования гелия из широко распространённого в природе вещества — водорода».

«Решение этой труднейшей и величественной задачи навсегда сняло бы с человечества заботу о необходимых для его существования на Земле запасов энергии».

Решение проблемы управления термоядерными реакциями записано как одна из важнейших задач науки в Программе КПСС, принятой XXII съездом КПСС.

Совсем недавно возникла новая область радиофизики и радиотехники — квантовая радиотехника. Используя так называемые квантовые законы, управляющие движением электронов в атомах, создатели этой новой области науки и техники построили приборы — квантовые генераторы и усилители. Эти приборы позволяют получать узкие пучки радио- и световых волн, передающие энергию на практически неограниченное расстояние.

Знание законов, управляющих поведением атомов и молекул, позволило получать искусственно новые материалы с заданными свойствами. В настоящее время умеют получать искусственным путём даже алмазы. Физика и химия дают возможность получать и такие вещества, которых не было ещё в природе. Искусственные синтетические материалы заменяют металлы, шерсть, хлопчатобумажные ткани и строительные материалы.

Успехи физики и химии позволили решить грандиозную научно-техническую задачу: начать освоение космоса человеком.

2. Задачи, поставленные Программой КПСС перед советскими физиками. Применение достижений науки в различных областях техники открывает огромные перспективы для развития

экономики и культуры. Вот почему наша партия придаёт огромное значение развитию науки. В Программе КПСС записано:

«Партия будет всемерно содействовать дальнейшему усилению роли науки в строительстве коммунистического общества, поощрять исследования, открывающие новые возможности в развитии производительных сил, широкому и быстрому внедрению в практику новейших научно-технических достижений, решительному подъёму экспериментальных работ, в том числе непосредственно на производстве, образцовой постановке научно-технической информации всестороннего изучения и распространения отечественного и зарубежного передового опыта. Наука станет в полной мере непосредственной производительной силой».

Придавая большое значение развитию науки, партия в своей программе выдвигает перед наукой важные задачи: «...разработка научных основ единой энергетической системы, открытие новых источников энергии и способов прямого преобразования тепловой, ядерной, солнечной и химической энергии в электрическую, решение проблемы управления термоядерными реакциями; разработка теории и принципов создания новых машин, автоматических и телемеханических систем, интенсивное развитие радиоэлектроники, разработка теоретических основ и технического совершенствования вычислительных, управляющих и информационных машин».

В решении этих задач существенную роль играет физика, которая глубоко проникла в современную технику.

Одной из важных особенностей физики является широкое применение её в различных областях науки. Современная физика принимает активное участие в решении такой сложной задачи, как выяснение сущности жизни и изыскание способов управления жизненными процессами. Программа КПСС намечает перед биологическими науками такие главные задачи:

«Интересы человечества выдвигают перед этими науками в качестве главных задач выяснение сущности явлений жизни, вскрытие биологических закономерностей развития органического мира, изучение физики, химии живого, разработку различных способов управления жизненными процессами, в частности обменом веществ, наследственностью и направленным изменением организмов».

В решении этих задач огромное значение имеет физика. Новая область физической науки — биофизика — уже возникла и успешно развивается.

Наше время — время завоевания космоса. Создание советских искусственных спутников Земли открыло новую эру в истории человечества.

«Большие возможности, говорится в Программе КПСС, в открытии новых явлений и законов природы, в исследовании планет и Солнца создали искусственные спутники Земли и кос-

мические ракеты, позволившие человеку проникнуть в космос».

Реализация этих возможностей откроет перед наукой и человечеством новые горизонты.

В наше время, время бурного процесса развития науки и техники, с особой силой звучат пророческие слова гения человечества В. И. Ленина:

«Ум человеческий открыл много диковинного в природе и откроет ещё больше, увеличивая тем самым свою власть над ней».

ОТВЕТЫ.

Упр. 1. 2. $г^{1/2}\,см^{3/2}\,сек^{-1}$. 3. ± 10 ед. заряда СГСЭ. 4. 4 *дин*. 5. ≈ 11 *см*. 6. $ab = {}^1/_2\, bc$; $x = ac$. 7. $6{,}7 \times 10^{-2}$ ед. заряда СГСЭ.

Упр. 2. $2 \approx 0{,}19$ ед. заряда СГСЭ на $см^2$. 3. $1{,}05 \times 10^{-7}$ *к*.

Упр. 3. 1. $г^{1/2}\,см^{-\frac{1}{2}}\,сек^{-1}$. 3. 0,2. 4. 250. 5. 1000 *дин*. 6. 0,75; 0,71 (в точке на перпендикуляре к середине прямой, соединяющей заряды). 7. $1{,}8 \times 10^{-3}$.

Упр. 5. 1. $г^{1/2}\,см^{1/2}\,сек^{-1}$. 2. 400 *эрг*. 3. 30 *в*. 4. 500 ед. заряда СГСЭ. 5. 10^6 ед. заряда СГСЭ. 6. 9,8 *в*. 7. ≈ 1400 *е*. 8. $1{,}6 \times 10^{-12}$ *эрг*; $5{,}8 \times 10^7 \frac{см}{сек}$.

Упр. 6. 4. 180 *см*. 5. $C = r\frac{\varphi_1}{\varphi - \varphi_1}$. 6. $\varepsilon = \frac{U - U_1}{U_1}$. 7. ≈ 50 ед. заряда СГСЭ.

Упр. 8. 3. $0{,}017 \frac{ом \cdot мм^2}{м}$. 4. $0{,}94 \frac{ом \cdot мм^2}{м}$. 6. От 4 до 5 *м*. 7. 99,98 *ом*. 8. 1445 *кг*.

Упр. 9. 2. 82,5 *ом*; 1,2 *а*. 3. 2 *а*; 4,8 *а*. 4. 1,05 *ом*; 5,25 *в*; 1,31 *а*; 1,05 *а*; 2,63 *а*. 5. 0,5 *ом*; 0,45 *ом*; 6. 5 *а*.

Упр. 10. 1. 0,06 *а*. 2. 25 *а*; 122,5 *в*. 3. $r = R$.

Упр. 11. 1. 0,97 *а*; 0,64 *а*.

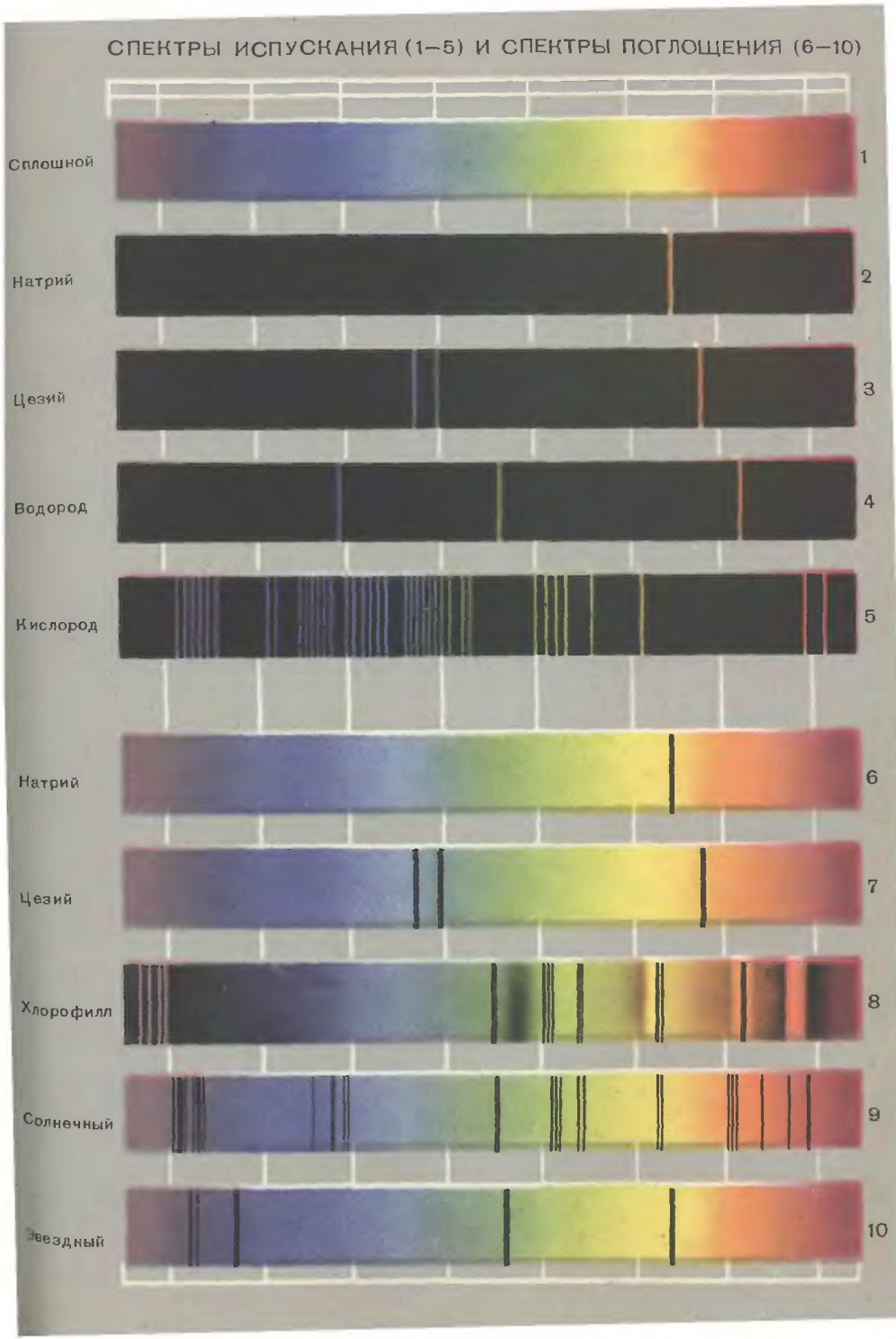
Упр. 14. 1. $\approx 0{,}08 \frac{вб}{м^2}$. 2. 4 *н*. 3. ≈ 1 *а*.

Упр. 16. 2. 1 *м*. 3. 156 *св*. 4. 50 000 *лк*.

Упр. 19. 2. 1,14. 3. 1,33. 4. $1{,}25 \cdot 10^{10} \frac{см}{сек}$. 6. 40°,5. 7. 1,53 *см*. 8. 5,32 *см* от передней поверхности пластинки.

Упр. 20. 5. 10 диоптрий; — 10 диоптрий. 6. 12,5 *см*. 7. 11 *см*; 22,5 *см*. 8. 18 *см*. 9. 36 *см*.

Упр. 21. 1. 32 *см*. 2. 2,5 раза. 3. 200 раз. 4. 200 раз.


СПЕКТРЫ ИСПУСКАНИЯ (1–5) И СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ (6–10)
Сплошной
1
Натрий
2
Цезий
3
Водород
4
Кислород
5
Натрий
6
Цезий
7
Хлорофилл
8
Солнечный
9
Звездный
10

Александр Васильевич Пёрышкин

КУРС ФИЗИКИ, Ч. III,
ДЛЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Редактор *А. Ф. Раева.*
Художественный редактор
В. С. Эрденко.
Технический редактор *Т. В. Карпова.*
Корректор *С. Л. Ракитова.*

Подписано к печати с матриц 24/VIII 1964 г. 60×90¹/₁₆. Печ. л. 24+0,125 вкл. Уч.-изд. л. 24,63+0,10 вкл.
Тираж 600 тыс. экз.
Издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР *по печати*
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Типография издательства «Уральский рабочий», Свердловск, проспект Ленина, 49.
Заказ 673.

Цена без переплёта 34 коп.
Переплёт бум. 7 коп., коленкор. 15 коп.